Este libro contempla una visión global sobre los conocimientos actúales de las dos ciencias dotadas de mayor autonomía: la física y la biología.
No se trata de un libro "futurista", sino de una mirada práctica y actualizada sobre la ciencia. Pone de relieve la compleja relación que existe entre la comunidad científica y la sociedad en general, y predice cómo configurará la ciencia nuestro futuro, y viceversa.
El doctor Feinberg muestra asimismo que la ciencia está siendo modelada por los descubrimientos matemáticos y que el empleo de los computadores está cambiando el contenido y los procedimientos de la misma.

Gerald Feinberg ha sido profesor de Física en las Universidades de Cambridge y Columbia. Ha trabajado en los laboratorios del CERN (Ginebra) y en el de Brookhaven.

Claves ciertas G. Feinberg

89



Claves ciertas

Física cuántica, biología molecular y el futuro de la ciencia

Gerald Feinberg

Biblioteca
Científica
Salvat







Claves ciertas

Biblioteca
Científica
Salvat



Claves ciertas

Física cuántica, biología molecular y el futuro de la ciencia

Gerald Feinberg

SALVAT

Versión española de la obra original norteamericana
Solid clues, publicada por Simon & Schuster, Inc. de Nueva York

Traducción: Dr. Juan Iglesias
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8969-9 (Volumen 89)
Depósito Legal: B-6419-1995
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a. Marzo 1995
Printed in Spain

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1
La predicción del cambio científico 4
Los motores del cambio en la ciencia 6
Los procesos de cambio 11
La importancia de nuestra manera de calcular . . 13

Parte I
EL ESTADO DE LA CUESTIÓN: QUÉ SABEMOS AHORA

1. LA MATERIA Y SU EVOLUCIÓN: EL MUNDO DE LA FÍSICA 19
El mundo está hecho de partículas subatómicas . 21
Las propiedades del espacio 24
Partículas y campos 29
El mundo de los quarks y de los electrones . . . 33
Cómo suceden las cosas en el universo cuántico . 35

Qué nos permite comprender la física de las partículas 43

2. Una temible multiplicidad: la ciencia de la vida 47

Bajo la diversidad entre los seres vivientes subyace una estructura semejante 47
Cómo ha surgido la diversidad. 52
Los seres vivientes forman parte de una biosfera 57

Parte II
EN EL UMBRAL DE LA COMPRENSIÓN

3. El cuanto y el Cosmos: los físicos buscan respuestas 65

El estado final de la materia: el destino de los agujeros negros 68
Los problemas no resueltos acerca del espacio y el tiempo 75
¿Qué sucedió antes del «Big Bang»?. 90
El futuro a largo plazo del Universo. 95
¿Qué formas toma la materia?. 105
¿Por qué existe simetría en la naturaleza? 113

4. La molécula y la biosfera: los biólogos reflexionan sobre los enigmas de la vida . . 119

El origen de la vida sobre la Tierra 120
El desarrollo. 125
Envejecer: el final del desarrollo. 135

5. Más allá del microscopio y del telescopio: nuevas herramientas experimentales y nuevos descubrimientos 151

La visión de la gravedad. 152
La caza de fósiles cósmicos 158
Instantáneas del nanomundo 167

Parte III
UN PRÉSTAMO FECUNDO:
LOS INFLUJOS EXTERNOS SOBRE LA CIENCIA

6. La matemática: el lenguaje clásico del espacio, el tiempo y el cambio 177

La descripción del cambio 183
El origen de la complejidad 187
El caos 188
El orden. 191
Nuevas descripciones del espacio-tiempo 194
¿Por qué se puede aplicar la matemática a la ciencia? 199

7. Los computadores: la ciencia entra en una nueva era 205

El estímulo a la naturaleza. 208
La intuición basada en el computador 210
La interpretación del código genético 211
Cómo influyen los computadores en la manera de hacer ciencia 215
Los computadores del futuro 217

Parte IV
LA CIENCIA DEL SIGLO XXI

8. El futuro configurado por la ciencia: la aventura tecnológica 227

Las tecnologías físicas 229
La biotecnología. 239

9. El futuro modelo de la ciencia: nuevos procedimientos de búsqueda 249

La ciencia en grupo 250
Los recursos económicos de la ciencia 256
La comunicación en la ciencia 260
La red informática universal 262
El lugar de la ciencia en el mundo 264
La «imagen» del científico 266
Las amenazas internas a la ciencia 269
Las amenazas externas a la ciencia. 271

10. El futuro de la ciencia 277

Los cambios en la explicación científica 278
¿Existen límites a la comprensión científica?. . . 281
El surgimiento de nuevas ciencias 283
La desaparición de antiguas ciencias 285

Lecturas adicionales 291

Glosario 303

A Barbara,
por sus sugerencias y su inspiración

AGRADECIMIENTOS

Un libro como éste no podría haberse escrito sin una gran ayuda procedente de muchas personas, y es para mí una satisfacción agradecer a aquellos que me han prestado su ayuda. Muchos científicos han debatido generosamente conmigo sus opiniones acerca del estado actual y de las perspectivas futuras de su propia rama científica. En física, tengo que mencionar a los doctores Norman Christ, Sheldon Glashow, Tsung-dao Lee, I. I. Rabi, Richard Osgood, Edward Spiegel y Erick Weinberg; en química, a los doctores Philip Pechukas y Robert Shapiro; en biología, a Peter Gouras y a los doctores John Harding, Cyrus Levinthal y Robert Pollack; y en matemáticas, a los doctores John Chu y Michael Tabor. Algunas de las personas mencionadas han leído partes del original, al igual que los doctores Jeremy Bernstein, Isaac Levi, Sidney Morgenbesser, Ernest Nagel, Barbara Sakitt y Hao Wang. Agradezco a todos ellos las sugerencias que me ayudaron a aclarar la redacción y a eliminar errores. También quiero agradecer a Alice Mayhew, David Masello y Catherine Shaw sus utilísimas sugerencias editoriales, y a James Danella sus dibujos lineales. También agradezco a Debbie Posner, editora del manuscrito, su colaboración.

INTRODUCCIÓN

En este libro trato de predecir los cambios que durante las próximas décadas tendrán lugar en el contenido de la ciencia y en las vidas de los científicos. Me centraré en la ciencia pura, es decir, en el esfuerzo humano por comprender el Universo en que habitamos y todo lo que contiene.

La ciencia ha avanzado estudiando en primer lugar áreas limitadas de experiencia, y extendiendo de forma paulatina el ámbito de las ideas desarrolladas para comprender dichas áreas. A través de este proceso, los científicos han creado un conjunto coherente de principios, con un amplio abanico de aplicaciones. En realidad, estas nociones científicas carecen en la actualidad de rivales serios en lo que respecta a una comprensión sistemática de la experiencia humana. Constituyen el núcleo de la moderna visión del mundo. Los nuevos principios científicos influyen muy pronto sobre los demás aspectos del pensamiento humano. Por ejemplo, el desarrollo de una visión materialista del mundo fue en gran medida una respuesta a la labor que Newton llevó a cabo con respecto a la mecánica y la gravedad. Por lo tanto, es de esperar que los nuevos principios de la ciencia futura acaben por afectar todos los aspectos de nuestra visión del mundo.

Durante los últimos decenios ha habido ya enormes cambios dentro de la ciencia. En este período se han observado considerables mejoras en nuestra comprensión de muchos aspectos del Universo, desde las partículas subatómicas hasta la historia geológica de la Tierra, pasando por la biología molecular de la herencia. Estos cambios en el contenido de la ciencia

se han producido al mismo tiempo que un gran aumento en la cantidad de científicos y en el nivel de la financiación pública de la ciencia, como consecuencia, en parte, de estos mismos fenómenos. Por lo que sé, nadie predijo hace cincuenta años que ocurriría esta rápida consolidación del esfuerzo científico, ni tampoco cuáles serían sus derivaciones. Ante una mirada retrospectiva, sin embargo, se pone de relieve que los cambios en el contenido de la ciencia no pueden ser tratados de forma independiente con respecto a la interacción de la ciencia con la sociedad.

Durante los próximos decenios tendrán lugar otros importantes cambios científicos. ¿Debemos —y podemos— prever algunos de estos cambios? Contestaré afirmativamente a ambos interrogantes. El continuo desarrollo de la ciencia depende de la financiación pública de la investigación científica. A la opinión pública se le pide que apoye la ciencia del futuro, y que no se limite a evaluar los resultados de la ciencia del pasado. Además, el apoyo que se requiere es de un volumen impresionante. El nuevo acelerador de alta energía que han propuesto hace poco los que trabajan en la física de las partículas elementales costará varios miles de millones de dólares, y tardará siete años en construirse. También los astrónomos han propuesto carísimos proyectos a largo plazo, por ejemplo, observatorios situados en estaciones orbitales. Para justificar estas enormes necesidades económicas, los científicos necesitan determinar dónde se encuentran las lagunas de nuestro conocimiento, y prever la dirección de los futuros descubrimientos.

Los esfuerzos de previsión también pueden desempeñar un papel dentro de la ciencia. Centran la atención de los científicos sobre los problemas aún no resueltos, y esto ayuda a solucionarlos con más rapidez. Algo así ocurrió a principios del siglo XX en el terreno de la matemática, cuando el matemático alemán David Hilbert propuso una lista de problemas no solucionados. Gran parte de la labor de los matemáticos en el siglo actual se ha concentrado en solucionar estos problemas, y otros que han surgido a partir de ellos.

Mi análisis se centrará en dos ciencias: la física y la biología. Se trata de las dos ramas de la ciencia contemporánea que están avanzando con más rapidez, y muchos de los descubrimientos más importantes que tendrán lugar en las próximas décadas se van a producir en estas ciencias. Si prevemos tales descubrimientos, dispondremos de una noción fidedigna acerca de la ciencia del futuro.

La física versa sobre las propiedades más generales de la materia y la energía. Sus principios se aplican a toda la naturaleza, incluyendo también aquellas áreas estudiadas por las demás ciencias. La física ha hecho grandes progresos durante la pasada generación, sobre todo en la comprensión de los factores subatómicos constituyentes de la materia. Estos avances han planteado nuevas preguntas, que determinan en gran parte las futuras tareas de los físicos. Asimismo, la física es la ciencia dotada de mayor autonomía, porque sus leyes no se derivan de otras ciencias, como ocurre con algunas leyes químicas y geológicas que proceden de la física. Por último, los cambios de estilo de vida profesional provocados por el incremento en la inversión y en el ámbito de los proyectos científicos han sido más notables en la física. Por lo tanto, si examinamos lo que está sucediendo en esta disciplina, nos daremos cuenta de lo que puede ocurrir muy pronto en las demás ciencias.

En el futuro la física estará en condiciones de brindar explicaciones detalladas allí donde en la actualidad sólo puede sugerir esquemas generales. Esto lo permitirá esencialmente la introducción de nuevas formas de estructuras matemáticas y de nuevas herramientas informáticas que permitirán analizar diversos tipos de fenómenos complejos. Esto permitirá, a su vez, una aplicación más específica de la física a las otras ciencias que estudian dichos fenómenos, por ejemplo, la química orgánica y la biología. También el ámbito de la tecnología física se extenderá hasta abarcar novedades como la ingeniería molecular, y facilitará la construcción de dispositivos miniaturizados de una complejidad funcional sin precedentes.

El tema al cual se dedica la biología resulta tan fascinante como el de la física, aunque sus leyes no se apliquen a una gama tan amplia de fenómenos. Además, las grandes generalizaciones de la biología —la evolución, por ejemplo— a menudo son de una aplicación al pensamiento humano en general que es más inmediata que en el caso de la física. Los biólogos han logrado comprender muchos fenómenos a lo largo de las últimas décadas, por ejemplo, las bases bioquímicas de la herencia. Sin embargo, todavía no han contestado muchas preguntas importantes, como, por ejemplo, el origen de la vida o la causa del

envejecimiento. Existen perspectivas favorables para solucionar estos problemas dentro de la próxima generación, mediante nuevos avances teóricos y experimentales. Además, estos progresos tendrán inmensas consecuencias prácticas a través de su aplicación a las nuevas disciplinas de la biotecnología.

La física y la biología se parecerán cada vez más entre sí a lo largo de la próxima generación, lo cual nos llevará hacia una ciencia más unificada, pero no hay demasiados motivos para pensar que la biología llegue a convertirse en parte integrante de la física. Los biólogos no suelen poner en duda que los fenómenos de la vida surgen de las leyes físicas. Sin embargo, resulta improbable que pronto logremos comprender todas las actividades de los organismos complejos a través de la aplicación de tales leyes. Menos probable aún es que lleguemos a comprender los seres vivientes directamente en términos de las partículas subatómicas que los componen. A lo largo del proceso se pierden demasiados detalles de los fenómenos, cuando tratamos de hallar explicaciones que salven esta laguna tan considerable.

Las nociones procedentes de la ciencia física han efectuado ciertas incursiones importantes en el seno de la biología (sobre todo en la biología molecular), y en el futuro se producirán más convergencias de esta clase. A pesar de todo, la mayoría de los fenómenos de interés para los biólogos continuarán estudiándose a través de métodos y de ideas que se originan en la biología, por lo menos durante las próximas décadas. En consecuencia, la biología —a diferencia de la química, que se está transformando en parte de la física— seguirá siendo una ciencia relativamente autónoma.

Las demás ciencias también estudian fenómenos que tienen un gran interés. Sin embargo, como en el caso de la astronomía, ya se han convertido efectivamente en una parte de la física por lo que respecta a sus concepciones y a sus técnicas, o bien, como en el caso de la psicología, aún no han progresado lo suficiente para que podamos predecir su futuro. Por estas razones no me centraré en estas otras ciencias a lo largo del libro.

LA PREDICCIÓN DEL CAMBIO CIENTÍFICO

Para determinar lo que será la ciencia del futuro, necesitamos disponer de una concepción acerca de lo que es la ciencia. Definiré la ciencia como «el esfuerzo sistemático para comprender los fenómenos naturales». Mediante tal esfuerzo, los científicos han elaborado una fina trama de conexiones intelectuales entre dichos fenómenos, y han descubierto generalizaciones de largo alcance —por ejemplo, la ley de la conservación de la energía— que desempeñan un papel esencial en numerosos campos científicos. Estas generalizaciones son las que distinguen con más precisión la ciencia moderna de los demás intentos de hallar el orden subyacente a la experiencia humana.

La ciencia se caracteriza tanto por sus instituciones y sus procedimientos como por sus objetivos y sus resultados, elementos todos ellos que han evolucionado de forma considerable desde el siglo XVI, época en que nació la ciencia moderna. En su forma actual, el esfuerzo científico ha mostrado un carácter muy cooperativo, ya que combina la labor de numerosos científicos que trabajan en problemas relacionados entre sí. También ha asumido una forma acumulativa, dado que los trabajos de las anteriores generaciones de científicos sirven de base a los científicos actuales. Estos dos rasgos desempeñan un papel fundamental en la forma de trabajar científicamente.

No existe un procedimiento que permita anticipar el futuro de la ciencia: una «ciencia de la ciencia», y hay científicos que llegan a sostener que en principio resulta imposible lograrlo. Para mostrar por qué considero poco convincentes sus argumentos, describiré varios de los métodos que empleo para reflexionar sobre el futuro contenido de la ciencia. Estos métodos son complementarios, ya que se aplican a diferentes aspectos de la ciencia futura.

Con respecto a aquellos progresos que surjan de la ciencia ya existente, trataré de descubrir cuáles son las lagunas de nuestros actuales conocimientos, y a continuación propondré una manera de solucionarlas. Esto se parece un poco a efectuar conjeturas sobre la forma de las piezas que nos falten en un rompecabezas, labor que resulta cada vez más fácil a medida que vamos avanzando en la solución. Este enfoque es fructífero en aquellas ciencias como la física de las partículas elementales o la bioquímica, que ya han realizado grandes progresos. Predecir el descubrimiento de una nueva partícula subatómica o de un nuevo elemento químico es más fácil que adivinar los futuros logros en un terreno incipiente como, por ejemplo, la neuropsicología, donde faltan muchas piezas de conocimiento.

Mediante este enfoque de «rompecabezas», describiré (en el capítulo 1 con respecto a la física, y en el capítulo 2 con respecto a la biología) algunos de los elementos decisivos en nuestro actual estado de comprensión de los fenómenos. Estos resúmenes se proponen que el libro adquiera un carácter autosuficiente, de manera que un lector que no posea un previo conocimiento detallado de un área determinada de la ciencia esté en condiciones de seguir el posterior examen de los futuros avances en ese terreno. Debido a lo pragmático de su función, he limitado el resumen a aquellas áreas de la ciencia que es de esperar que cambien con rapidez, por ejemplo la biología molecular y la cosmología, omitiendo en cambio aquellas otras —como la acústica y la anatomía— donde se realizarán menos descubrimientos nuevos.

En los capítulos 3 y 4 me centraré en aquellas áreas de la física y de la biología en las que podamos formular preguntas cuyas respuestas desconocemos. El futuro avance de la ciencia se producirá al buscar las contestaciones a tales interrogantes.

LOS MOTORES DEL CAMBIO EN LA CIENCIA

Resulta especialmente difícil predecir avances que impliquen una diferencia radical con respecto al estado actual de la ciencia, ya que el conocimiento o la teoría disponibles no dan indicios de ello. Sin embargo, éste es el tipo de posibilidades que fascinan por igual a científicos y no científicos. La radiactividad, por ejemplo, descubierta en 1896, había sido algo completamente inesperado, y para comprenderla se hizo necesario superar la física newtoniana y llegar a la física cuántica. En este libro trato de prever estos desarrollos científicos analizando la forma en que la ciencia ha evolucionado en el pasado, y utilizando esta perspectiva para efectuar suposiciones fundadas sobre futuros avances.

Un importante elemento de este análisis consiste en descubrir cuáles son los principales motores del cambio en la ciencia, aquellas fuerzas que actúan para cambiar la ciencia desde dentro y desde fuera. Un motor de este tipo está constituido por el desarrollo de nuevas técnicas experimentales. Éstas pueden asumir la forma de nuevos métodos de observación, como, por ejemplo, los radiotelescopios que revolucionaron la astronomía

alrededor de 1950. Estos telescopios permitieron a los astrónomos observar muchos fenómenos nuevos, por ejemplo, los púlsares, que llevaron a un cambio radical en nuestra imagen acerca de lo que contiene el Universo. Otra forma de estas nuevas técnicas empíricas implica que los métodos experimentales utilizados en una ciencia se apliquen a las necesidades de otras ciencias. Esto fue lo que ocurrió cuando los rayos X —que los físicos habían empleado para estudiar la estructura de los cristales metálicos— fueron adaptados por los biólogos para estudiar materiales biológicos cristalizados. Tales estudios acabaron permitiendo desentrañar la estructura del ADN.

Los avances en la ciencia experimental plantean el siguiente interrogante: ¿en qué medida nuestra imagen del Universo depende de los instrumentos que poseemos? Algunos científicos y filósofos —como, por ejemplo, el astrofísico británico Arthur Eddington— han sugerido que nuestra concepción del Universo reposa de manera decisiva sobre las herramientas que empleamos para observarlo, al igual que las capturas de un pescador dependen del tamaño que tenga la malla de su red. Esta opinión resulta exagerada. Los científicos creen muchas cosas que no han logrado observar por falta de instrumentos adecuados. Por ejemplo, los biólogos creían en la existencia de los genes con mucha antelación a la existencia de técnicas para observarlos directamente. En la actualidad hay muchos físicos que creen que el Universo está lleno de gran cantidad de partículas subatómicas llamadas neutrinos, pero dichas partículas son inobservables por el momento. El hecho de que a menudo estas creencias son verificadas por una observación posterior nos muestra que no dependemos por completo de nuestros actuales instrumentos.

Sin embargo, sigue habiendo algo de verdad en la analogía de la red del pescador, ya que puede haber aspectos inimaginados del Universo que sólo se revelen empleando nuevas herramientas de observación. A lo largo de la historia de la ciencia se han efectuado descubrimientos de esta clase en repetidas ocasiones, sobre todo en aquellos sectores donde disponemos de una escasa orientación teórica sobre lo que pueda existir, situación que caracteriza a la mayor parte de la ciencia. Un ejemplo precoz fue el descubrimiento de colonias integradas de organismos que vivían en el fondo del mar, en aquellas regiones donde mana de la corteza submarina un agua cálida y químicamente rica. Estas colonias forman un medio ambiente que resulta esen-

cialmente independiente de la luz solar como fuente de energía, posibilidad que antes no se había tenido en cuenta con respecto a la vida sobre la Tierra, aunque no existiese ninguna razón teórica para descartarla. Un posible descubrimiento futuro podría ser el de microorganismos que empleasen en su metabolismo reacciones químicas muy distintas a las que conocemos. Tales organismos podrían descubrirse a través de un avance tan sencillo como, por ejemplo, un nuevo método para cultivar microorganismos imposibles de cultivar en los medios actualmente disponibles.

La forma en que los científicos desarrollan nuevos métodos de observación depende en cierta medida del estado global de la tecnología en el mundo. A veces se desarrolla una nueva tecnología debido a sus aplicaciones científicas; en otras ocasiones, debido a sus aplicaciones prácticas, y a menudo, por ambos motivos. Por ejemplo, en la década de 1960 se produjo una serie de descubrimientos en física atómica que culminó con el desarrollo de los láseres simples. Utilizando el resultado de descubrimientos en la química y la óptica, el rendimiento del láser fue mejorado con la esperanza de encontrarle aplicaciones prácticas. Finalmente, los láseres más perfeccionados se aplicaron a nuevos problemas científicos, en la física atómica y en la física de las partículas elementales.

En el capítulo 5 examinaremos algunas de las nuevas técnicas de observación que espero que se desarrollen en las diversas ciencias, y se describirán algunos de los fenómenos que pueden desvelar.

El cambio científico también se ve impulsado por la aplicación a la ciencia de nuevas formas matemáticas. Aunque la matemática del siglo XX se ha desarrollado con gran independencia de las ciencias naturales, ha existido cierta simbiosis entre ambos tipos de ciencia. A menudo ha ocurrido que determinadas estructuras matemáticas han demostrado ser el lenguaje «natural» requerido por una ciencia, y gracias al uso sistemático de tales estructuras han surgido perspectivas de importancia. Esto fue lo que sucedió cuando Einstein adaptó la estructura matemática denominada análisis de tensores a su teoría general de la relatividad. Algunos biólogos y matemáticos creen que en la actualidad está produciéndose un proceso semejante a través de la aplicación de una rama de las matemáticas, conocida con el nombre de teoría de las catástrofes, a los problemas de la biología. En el futuro, los científicos continuarán haciendo uso de las nuevas matemáticas. En muchas áreas científicas hay fenómenos tan complejos que requerirán nuevas descripciones simbólicas para que lleguemos a comprenderlos en algún momento. En el capítulo 6 analizaremos las aplicaciones científicas de la matemática, y discutiremos el tema desconcertante acerca de por qué tiene que aplicarse la matemática a la ciencia.

A medida que la investigación científica se ha vuelto cada vez más dependiente de la financiación oficial, la actitud de la sociedad con respecto a la ciencia se ha convertido por sí misma en un importante motor del cambio. La manera en que se distribuyen los fondos económicos —y las cuantías de que se dispone— depende en gran parte de factores fuera del control de los científicos. Y sin embargo, dichos factores desempeñan un papel significativo para determinar el ámbito de la investigación científica, y por tanto los descubrimientos realizados por los científicos.

Resulta inimaginable que la ciencia manifieste su estado actual si no fuese por la gran inversión de fondos públicos que se efectuó en el campo de la investigación científica a lo largo del período que siguió a la Segunda Guerra Mundial, primero en los Estados Unidos y más tarde en otros países. Los motivos de esta inversión eran en parte políticos, en parte una muestra de gratitud por el papel desempeñado por los científicos durante la conflagración, y en parte desconocidos. No hay ninguna garantía de que el apoyo financiero continuará al nivel que los científicos consideran deseable, y resulta difícil predecir qué va a suceder a este respecto. A pesar de todo, puesto que bastante más de la mitad de los fondos dedicados en los Estados Unidos a la investigación básica son proporcionados por el gobierno federal, para predecir el futuro de la ciencia resulta esencial efectuar algunos cálculos en relación con el futuro de la financiación oficial. En el capítulo 9 dejo constancia de mis propias cábalas sobre el tema.

La sociedad también influye sobre la ciencia de un modo que no está vinculado directamente con la concesión o la retirada de fondos. La mayoría de las sociedades consideran que la investigación científica debe realizarse sobre determinados temas de especial interés. Siempre gozan de un amplio respaldo los objetivos prácticos, tales como el mejoramiento de los aspectos negativos de la vida humana —por ejemplo, la elimina-

ción de las enfermedades—, y los científicos se dedican a tales objetivos sin verse perturbados por la censura de la opinión pública. Otras actividades científicas, sobre todo las que desafían la opinión moral o intelectual generalizadas en una sociedad, pueden provocar una áspera controversia. Por ejemplo, en el siglo XIX la teoría de la evolución de Darwin se enfrentó a una amplia polémica pública, y hoy día sigue siendo ofensiva para algunas personas. Cuando las implicaciones de un descubrimiento científico son consideradas como algo sospechoso, la sociedad puede tratar de limitar las investigaciones en ese terreno. La Alemania nazi, la Rusia estalinista y la Italia de la época medieval constituyen un ejemplo de cómo las presiones sociales pueden cohibir el avance científico. Sin embargo, incluso en sociedades más tolerantes, la opinión pública puede impedir o «dirigir» la investigación científica. Por ejemplo, a pesar del sólido respaldo que se otorga a la curación de enfermedades individuales, muchas personas —entre las que se cuentan algunos científicos— consideran que la búsqueda de una curación del envejecimiento es algo discutible, lo cual probablemente ha limitado el avance en este terreno. La investigación referente a las causas de la conducta aberrante —por ejemplo, el crimen violento— ha alternado entre los factores hereditarios y los factores ambientales, a medida que ha variado el pensamiento social.

Las áreas de investigación que la sociedad considera aceptables pueden tener una escasa relación con el estado de la ciencia en sí misma. Por el contrario, tales opciones surgen de corrientes que existen en las profundidades de la sociedad. Para predecir la influencia de estos aspectos del futuro de la ciencia, es preciso adquirir cierto sentido sobre lo que ocurrirá dentro de la sociedad en su conjunto, lo cual no es nada fácil. A pesar de todo, en el capítulo 9 me he esforzado por conjeturar qué formas asumirá este influjo.

En la última parte del libro, la ciencia se contempla en cuanto fenómeno social. Uno de sus aspectos consisten en la ciencia aplicada, o tecnología. En el capítulo 8 se sugieren ciertas áreas en las que los avances en ciencia pura —tanto en física como en biología— conducen a formas nuevas de tecnología que afectarán radicalmente la vida humana. A continuación, en el capítulo 9, se examina la forma en que cambiarán las vidas profesionales de los científicos —por ejemplo, la manera en que comunicarán su trabajo a otros científicos— como consecuencia de los avances que se van a producir, tanto dentro de la ciencia como fuera de ella.

LOS PROCESOS DE CAMBIO

Para predecir el futuro de la ciencia utilizo un tercer método, consistente en el estudio de los procesos internos a través de los cuales cambia la ciencia. Ésta avanza a partir de un área reducida, y progresa hacia el exterior de dicho ámbito. Debido a tal proceso, en nuestro mundo científico actual no hay nada que nos indique lo cerca que estamos de las fronteras del conocimiento científico. Esto se aplica en especial a la física, que no posee un objeto fijo, aunque también se aplica al contenido de la ciencia en conjunto. Existen asimismo ramas de la ciencia que al principio parecen independientes, pero que acaban por fusionarse con el resto de la ciencia. Por ejemplo, el estudio de los espectros —la luz emitida por los gases calientes— se convirtió en parte de la física atómica. En mi opinión, en el futuro va a continuar el patrón de ensanchamiento de las fronteras de la ciencia y la eliminación de los límites internos dentro de la ciencia. En el capítulo 10 se exponen algunos ejemplos concretos a este respecto.

Otro aspecto relevante del avance de la ciencia es la relación entre la teoría y la experimentación. Se han manifestado diversas opiniones acerca de sus papeles respectivos, que van desde la creencia de Newton según la cual los científicos tienen que ajustarse con precisión a lo que señalan los experimentos —sin formular ninguna hipótesis adicional— hasta la afirmación de Einstein según la cual las leyes físicas son creaciones libres de la mente, y no directamente obtenibles a través de la observación. Tengo la impresión de que el papel de la teoría y de la experimentación en la ciencia es más complejo de lo que señalan estos dos extremos, y su importancia relativa difiere según las distintas disciplinas, y según el momento específico dentro de cada disciplina. La teoría desempeña un papel más importante en la física que en las otras ciencias, pero el elemento teórico de las demás ciencias cada vez resultará más importante.

La mejor manera de describir el papel de la teoría y de la experimentación en física es considerarlo como una especie de

alternancia intelectual, en la que primero una y luego la otra desempeñan el papel primordial. Ha habido períodos en los que las teorías explicaban la mayoría de lo que se conocía; los experimentos se limitaban a comprobar las nuevas consecuencias de tales teorías, o trataban de descubrir fenómenos insospechados. Lo primero se dio durante muchos años con respecto a la teoría de la gravitación, hasta que prevaleció la teoría general de la relatividad de Einstein. El progreso ha surgido gracias al hallazgo de nuevos modos de comprobar la teoría, y a extraer de ella consecuencias inesperadas.

Ha habido otros períodos en los cuales las teorías no han logrado explicar los fenómenos conocidos. Los avances principales han sido posibles gracias a la elaboración de teorías nuevas, que sí lograban explicar los fenómenos, o a la observación empírica de nuevos fenómenos que proporcionaban el estímulo necesario para efectuar un progreso teórico.

La experimentación predominó en el lapso comprendido entre 1950 y 1965 en la física subatómica. Se descubrieron numerosos hechos nuevos, pero no había ninguna teoría adecuada que los explicase. Bajo la presión de estos descubrimientos experimentales, los teóricos acabaron por crear dos conceptos nuevos e importantes: la teoría de los quarks como constituyentes de los hadrones, y las teorías unificadas de las interacciones entre partículas. Las teorías basadas en estas nociones explicaron la mayoría de los descubrimientos experimentales que tuvieron lugar durante las dos décadas anteriores. Sin embargo, estas nuevas teorías fueron aún más allá, y sugirieron que habría que descubrir gran número de nuevos fenómenos, que no eran accesibles mediante los métodos experimentales disponibles. Estas suposiciones constituían un reto para los físicos experimentales, estimulándoles a desarrollar nuevas técnicas que les permitiesen observar tales fenómenos. En nuestros días los científicos están venciendo este desafío, y es probable que a lo largo del proceso se descubran nuevos fenómenos inesperados que den lugar a otros experimentos.

Este modelo de la relación entre teoría y experimentación se ajusta a determinado enfoque de la predicción de futuros descubrimientos científicos. Cuando en un sector de la ciencia hay una teoría que explica de modo habitual los fenómenos conocidos, es necesario buscar los descubrimientos futuros entre aquellos aspectos de la teoría que todavía no se hayan comprobado. Si el sector en cuestión se muestra rico en fenómenos que no se han incorporado adecuadamente a una teoría general, cabe esperar nuevos avances como consecuencia de una síntesis teórica. Sin embargo, para llevar a cabo dicha síntesis, es posible que primero haya que descubrir fenómenos adicionales.

En física se utilizan a menudo los análisis teóricos para brindar una perspectiva acerca de situaciones que la experimentación jamás logrará investigar directamente. En los años recientes, a través de los métodos de la física teórica, los científicos han estudiado procesos que pueden ocurrir en un futuro muy lejano, cuando ya no haya seres inteligentes que puedan observarlos. Mediante estos estudios teóricos, la mente humana se halla en condiciones de trascender algunas de las limitaciones que nos impone el hecho de estar constituidos por materia perecedera.

Todo esto nos indica que, para predecir el futuro de la ciencia, hemos de examinar al mismo tiempo las innovaciones teóricas y las experimentales. Nos dedicaremos a las primeras en los capítulos 3 y 4, y a las segundas en el capítulo 5.

LA IMPORTANCIA DE NUESTRA MANERA DE CALCULAR

En determinadas ramas de la ciencia el progreso depende principalmente del hallazgo de nuevas formas de calcular, es decir, de establecer las consecuencias de algo que ya conocemos en principio. Ésta es la situación actual en el campo de la física del plasma, que se emplea al mismo tiempo para estudiar las condiciones existentes en el interior de las estrellas y para obtener en la Tierra una fusión nuclear controlada.

Un plasma es un estado de la materia en el cual algunos de los electrones se encuentran separados permanentemente de los átomos, y tanto los electrones como los átomos con carga vagan en libertad. El comportamiento de los plasmas se halla regido por ecuaciones bien conocidas, que han sido estudiadas en diversos contextos a lo largo de muchos años. Sin embargo, en el contexto específico de los plasmas, sobre todo en presencia de fuerzas magnéticas, a menudo resulta difícil extraer de aquellas ecuaciones una predicción fidedigna acerca del comportamiento del plasma. Los físicos creen firmemente que se trata de un problema de cálculo matemático, y no de un defecto en las propias

ecuaciones. Sin embargo, tal distinción no ayuda demasiado a quienes tratan de comprender cómo actuará un plasma dentro de unas circunstancias específicas, o de predecir las condiciones idóneas para que ocurra una fusión nuclear útil.

En física teórica resulta muy sutil la distinción entre una innovación fundamental y un simple avance en el cálculo de las consecuencias de una teoría ya existente. No es frecuente que un científico comience un análisis teórico mediante la noción de que éste exigirá nuevas ideas revolucionarias. Por lo general, los científicos empiezan apelando al conocimiento ya aceptado, y tratan de elaborar sus consecuencias. Cuando el resultado de un cálculo difiere de lo que se observa, es difícil decidir si hay que cambiar la teoría o el método de cálculo, a menos que sepamos que el cálculo brinda una imagen fidedigna de aquello que implica la teoría subyacente. Veamos un ejemplo al respecto. Durante muchos años los físicos creyeron que su incapacidad para efectuar grandes avances hacia una teoría de las partículas subatómicas se debía a la carencia de adecuados métodos de cálculo para el tratamiento de las correspondientes ecuaciones. Sin embargo, después de modificar las ecuaciones para ajustarlas a las nuevas ideas, se descubrió que los antiguos métodos de cálculo *sí eran* adecuados, siempre que se aplicasen a las ecuaciones correctas.

El influjo del método de cálculo sobre los resultados que obtienen los científicos es tan profundo que a menudo un método en particular adquiere una vida propia. Llega a configurar así la imagen global que tengan los científicos con respecto a determinados ámbitos de conocimiento, tanto o más que las nociones básicas en dicho sector. A finales de la década de 1940 el físico norteamericano Richard Feynman presentó un método matemático para trabajar con algunas de las ecuaciones pertenecientes a la teoría del campo cuántico. Dicho método implica un empleo sistemático de determinadas imágenes, que ahora reciben el nombre de diagramas de Feynman, como guía para efectuar los cálculos. Feynman mostró que cualquier interacción de partículas subatómicas podía representarse mediante una serie de imágenes, y que —si se aplicaban a estas imágenes unas reglas sencillas— podían obtenerse los mismos resultados matemáticos que los que aparecen gracias a las ecuaciones de la teoría del campo cuántico. Aunque en realidad no modificó realmente las ecuaciones en sí mismas, el método de Feynman demostró ser tan eficaz que sus imágenes se han convertido en una forma universal de conceptualizar los procesos subatómicos. La mayoría de los físicos comienzan cualquier estudio de estos procesos dibujando los correspondientes diagramas de Feynman.

Los cálculos realizados mediante computadores están comenzando a influir radicalmente en la manera en que los científicos enfocan y llevan a cabo su labor. En muchos cálculos informáticos se introducen modelos matemáticos específicos acerca de los fenómenos que se analizan. En dichos modelos se simplifican algunas de las complejidades de los fenómenos, con objeto de facilitar los cálculos más convenientes. Por ejemplo, en algunos modelos sólo se permite que se muevan en una dimensión determinados objetos que de hecho pueden moverse en tres dimensiones. A veces los supuestos específicos que se realizan en el modelo llegan a tomarse con más seriedad que la que se pensó en un principio, cambiando de hecho las leyes fundamentales de manera que podamos calcular con más efectividad. Tal simplificación puede conducir a un progreso, pero hemos de mostrarnos escépticos con respecto a la noción según la cual las leyes naturales se hallan íntimamente vinculadas con la capacidad humana de cálculo. Si la razón principal para apelar a un modelo consiste en su adaptabilidad al cálculo numérico, es improbable que el modelo sobreviva al rápido y continuado incremento de la capacidad de cálculo. Esto no equivale a afirmar que hay que considerar que los cálculos numéricos son automáticamente inferiores al tratamiento simbólico, en cuanto forma de sondear las consecuencias de las ecuaciones matemáticas. En los últimos años han surgido muchas ideas importantes a partir de cálculos numéricos, tanto en la ciencia como en determinados campos de la matemática pura.

Confío en que esta tendencia se incremente, a medida que se vaya extendiendo la utilización de los computadores. Para los científicos de mediana edad —como es mi caso— que hemos sido formados para pensar que los computadores son innovaciones relativamente exóticas, constituye toda una revelación el contemplar cómo los científicos más jóvenes —que han crecido junto con los computadores— los incorporan en su labor. En el capítulo 7, y también en el 9, examinaremos el papel de los computadores en la ciencia del futuro.

PARTE I

EL ESTADO DE LA CUESTIÓN: QUÉ SABEMOS AHORA

1. LA MATERIA Y SU EVOLUCIÓN: EL MUNDO DE LA FÍSICA

Se suele suponer que algo constituye un conocimiento sólo en el caso de que se sepa de manera específica y permanente que es verdad, pero esta perspectiva resulta peligrosamente equívoca. La ciencia es una actividad que llevan a cabo los seres humanos, y en lo que hagamos aquí no se tiene que esperar que haya más infalibilidad de la que existe en cualquier otro propósito humano. Hay que considerar como conocimiento científico aquello que los científicos tienen suficientes razones para creer en un momento dado. Si una de tales creencias acaba por mostrarse errónea, entonces hemos de honrar a aquellos que demostraron que estaba equivocada, sin menospreciar a los que pensaban que era correcta. Una de las grandes virtudes del conocimiento científico es que se puede corregir. En realidad, la ciencia moderna surgió precisamente como rebelión contra la religión dogmática, para la cual era una virtud el persistir en una creencia. Sería una amarga ironía el que la ciencia llegase a repudiar este aspecto de sus orígenes, aspirando a certezas imposibles.

Algunas nociones científicas de aplicación general —por ejemplo, la ley de la conservación de energía— continuarán perdurando. Rara vez estas leyes fundamentales se ven desbancadas, aunque a veces se modifiquen. A medida que la ciencia avanza, puede restringirse la gama de fenómenos a los cuales se aplica una ley fundamental, o quizá se modifique el significado de algunos de los términos que intervienen en la ley. Esto ha ocurrido en el pasado, y sin duda volverá a ocurrir en el futuro. Aquellos que emplean esta evidente «imperfección» científica

para criticar el conocimiento científico en conjunto, están confundiendo —en palabras de Eddington— la ciencia con la omnisciencia.

Sin embargo, siguen pendientes significativas preguntas sobre qué es lo que constituye el conocimiento científico. Por ejemplo, para responder a la pregunta ¿qué saben los científicos en la actualidad?, primero hay que decidir qué se entiende a través de la palabra «científicos». ¿Se trata de un único científico eminente, de la mayoría de quienes poseen un doctorado en determinado terreno, o de los miembros de la Academia Nacional de Ciencias? Es una pregunta especialmente ardua cuando se está reflexionando sobre temas que se encuentran en la zona fronteriza de la ciencia, y los distintos grupos de científicos pueden tener puntos de vista contradictorios. Incluso dentro de tales grupos, es probable que haya discusiones con respecto a qué es la «verdad». Por ejemplo, cabe dudar de la existencia de un consenso en relación con temas como la causa del envejecimiento en los mamíferos, o el origen de la vida.

Existen zonas de desacuerdo incluso dentro de las áreas más consolidadas de la ciencia. No está del todo claro, por ejemplo, cuáles son las opiniones acerca de los fundamentos de la física estadística o de la teoría cuántica que recibirían un asentimiento general por parte de los físicos de la Academia Nacional de Ciencias o de los claustros de las principales universidades del mundo. Una importante razón de este persistente desacuerdo es que —en la mayoría de los casos— la ciencia no dispone de procedimientos formalizados para llegar a un consenso general con respecto a las cuestiones que se debaten. Los científicos individuales toman sus propias decisiones al respecto, y optan sobre aquello que enseñarán o investigarán. Estas decisiones individuales rara vez se convierten en una postura formal de la ciencia en su conjunto. Por lo tanto, no es fácil determinar cuál es el estado actual de los conocimientos en un campo científico determinado, sobre todo si está próximo a zonas fronterizas.

Debido a estas complejidades, ninguna suma total del estado del conocimiento científico actual puede adquirir un carácter definitivo. He llegado a las conclusiones que se expresan en este libro leyendo las publicaciones realizadas por científicos que actualmente trabajan en diversos campos, y discutiendo con científicos de gran renombre sus opiniones acerca del estado presente en la disciplina que cultivan, y sus perspectivas de futuro.

Un defecto de este enfoque consiste en que omite las opiniones de los científicos que no pertenecen a la corriente predominante en su ámbito específico. Sin embargo, tal omisión no es decisiva para resumir el conocimiento existente en la actualidad. Aunque el trabajo de estos científicos disidentes llegue en parte a ser considerado como correcto y relevante, su adopción generalizada forma parte, en realidad, de la ciencia futura.

Esta visión de lo que saben los científicos constituye una presentación subjetiva. El lector tiene que ser consciente de que otro científico probablemente defienda opiniones distintas, y no existe un «tribunal científico de apelaciones» que decida quién tiene la razón en este momento. Únicamente el tiempo, y las decisiones de los científicos futuros, mostrarán si lo que yo creo ahora que es conocimiento científico merece tal distinción.

Los físicos saben las respuestas a dos clases de preguntas. Una de ellas es: ¿de qué está hecho el mundo?, es decir: ¿cuáles son los elementos relativamente sencillos que sirven como ladrillos de la materia? La segunda pregunta es: ¿cómo se comportan bajo diversas condiciones estos elementos simples, y las cosas más complicadas que están hechas con ellos? Muchos físicos consideran verosímil que, al contestar estas dos preguntas, en principio estamos en condiciones de proporcionar una explicación a todo lo que se refiere a la ciencia, no sólo en física, sino también en biología e incluso en psicología. Sean cuales fueren los méritos de esta pretensión, de hecho no es verdad en la práctica, ni se trata de un objetivo urgente para la ciencia. Ahora lo más importante es el grado en que nuestro conocimiento fundamental acerca de los elementos constituyentes y de las leyes pueda utilizarse para explicar el resto de fenómenos físicos.

EL MUNDO ESTÁ HECHO DE PARTÍCULAS SUBATÓMICAS

Según los físicos contemporáneos, el mundo está formado por varios tipos de objetos, a los cuales nos referimos colectivamente con el nombre de partículas subatómicas. (Estas partículas también pueden considerarse como manifestaciones de algo aún más fundamental, conocido como campos cuánticos.

En este mismo capítulo se examinará el tema, más adelante.) Puede haber hasta 10^{80} copias idénticas de algunas de estas partículas en el Universo actual. Las formas de la materia que nos son familiares —tanto vivientes como no vivientes, en la Tierra y en los cielos— están compuestas en todos los casos por una combinación diferente de sólo tres tipos de partículas subatómicas: protones, neutrones y electrones. Sin embargo, en un laboratorio pueden producirse momentáneamente varias docenas de otros tipos de partículas, y se cree que existieron en grandes cantidades al principio del Universo.

Todas las partículas subatómicas se definen a través de unas determinadas cualidades: masa, espín y carga eléctrica. Si todas estas propiedades coinciden, dos partículas serán del mismo tipo. En caso contrario, serán partículas diferentes. Por lo que sabemos, las partículas del mismo tipo poseen una masa, un espín y una carga exactamente iguales, y no sólo unos rasgos muy parecidos. Si todos los electrones no fuesen idénticos, la materia quedaría colapsada. Si todos los fotones —las partículas que forman la luz— no fuesen idénticos, los láseres no funcionarían.

Cuando las partículas subatómicas entran en colisión entre sí, se transforman recíprocamente. La energía cinética del movimiento de las partículas de la luz se convierte en la energía vinculada con la masa (la energía de reposo) de las partículas pesadas. En muchos casos, incluso las partículas aisladas pueden convertirse en otras de manera espontánea, si las segundas poseen una masa inferior. En todas estas transformaciones sólo permanecen sin modificar unas cuantas propiedades, por ejemplo, la carga eléctrica total. Las partículas subatómicas no actúan como los ladrillos inmutables imaginados por ciertos filósofos griegos. A lo largo de los últimos años los físicos se han dado cuenta de que incluso el tipo de partículas subatómicas existentes ha cambiado de forma radical en el transcurso de la vida del Universo. Al parecer, la evolución tiene lugar a todos los niveles de la materia, y no sólo en el nivel más complejo de los seres vivientes. La fuerza impulsora de esta evolución es la expansión del Universo, la cual, cambiando el entorno en el cual se encuentran las partículas, las cambia a éstas mismas. Hace sólo veinte años, la idea de que las propiedades de las partículas subatómicas podían depender de su entorno hubiese sido considerada como una herejía. A pesar de todo, en la actualidad existe un notable respaldo teórico a esta conclusión.

En las condiciones en las que los físicos acostumbran observar las partículas subatómicas, no se percibe que varíen las propiedades que las definen, lo cual otorga a dichas propiedades una ilusión de estabilidad. Sin embargo, sometidas a las enormes temperaturas y densidades que prevalecieron en las fases iniciales del Universo, las propiedades de algunas partículas —por ejemplo, la masa— pueden haber sido muy distintas a lo que son ahora. La situación se asemeja a la variabilidad de un líquido, por ejemplo, el agua. Dentro de una gama bastante amplia de temperaturas, el agua permanece en estado líquido, y sus propiedades no cambian demasiado, sea cual fuere la temperatura dentro de esta gama. Pero si se somete el agua a temperaturas muy inferiores, o si se calienta por encima de los 100° C, sus propiedades cambian de manera brusca. El líquido se convierte en un sólido (hielo) o en un gas (vapor de agua). Los físicos denominan cambio de fase a este tipo de cambio, en el que las propiedades de una sustancia cambian drásticamente como resultado de una pequeña variación en sus condiciones ambientales.

El supuesto cambio en las propiedades de las partículas subatómicas a temperaturas muy elevadas también es considerado como un cambio de fase, que implica tanto las propiedades del espacio como las de las partículas que hay en él. En otras palabras, las partículas no reaccionan directamente ante un cambio de temperatura sino ante una alteración dentro del espacio, que es el medio donde se encuentran. (Esto es semejante a los diversos modos de reaccionar algunas sustancias químicas, según se disuelvan en agua en estado líquido o se hallen en suspensión en hielo sólido.)

Hervir o congelar agua es fácil, pero resulta muy difícil conseguir en un laboratorio las condiciones extremas que se hallaban presentes en el nacimiento del Universo. Sin embargo, los físicos están convencidos de que es cierta la teoría de que las partículas subatómicas —y el espacio mismo— experimentaron notables cambios de fase durante el gran estallido inicial, el *Big Bang*, y después de éste. El rápido enfriamiento que siguió a aquella explosión primordial debe haber generado diversos cambios de fase. Después de un tiempo increíblemente breve (quizá sólo un microsegundo), el material subatómico del joven Universo quedó estabilizado, combinándose en las partículas que conforman la materia actual.

LAS PROPIEDADES DEL ESPACIO

¿Cómo es posible que cambie el espacio, si éste se concibe como nada en absoluto? En la actualidad, los físicos ya no piensan así con respecto al espacio. En su teoría general de la relatividad, y siguiendo los trabajos realizados por los matemáticos del siglo XIX Bernard Riemann y William Clifford, Einstein afirmó que las propiedades de una región del espacio dependen en gran medida de la presencia y de la forma de la materia que halla en sus proximidades. Por ejemplo, las propiedades geométricas del espacio cercano al Sol se hallan distorsionadas; dicho espacio está «curvado» a causa de la gran masa de la estrella solar. Un triángulo trazado mediante la intersección de los rayos luminosos cercanos al Sol no obedecería las reglas de la geometría euclidiana; sus ángulos no sumarían 180 grados. Esta distorsión del espacio y el correspondiente cambio en la forma en que pasa el tiempo son lo que los primeros físicos denominaron fuerza de gravedad, y lo que en la teoría de Einstein conduce al movimiento de los planetas en órbitas alrededor del Sol.

La idea de que el espacio puede curvarse también se aplica a uno de los grandes interrogantes que la astrofísica aún no ha contestado: nuestro Universo ¿es finito o infinito? Si el Universo contiene la cantidad suficiente de materia, el espacio quedaría tan distorsionado que el Universo sería finito, al igual que es finita la superficie de una esfera (mientras que la superficie de un plano se considera infinita). Esta hipotética distorsión en la forma del Universo, debida a la presencia de la materia, es semejante a la distorsión en la forma de una lámina de caucho, provocada por un peso colocado encima de ésta. El grado de distorsión aumenta a medida que se incremente el peso de la materia.

Si el Universo es finito, su tamaño global —en comparación con el tamaño de algunos de los objetos que contiene— puede variar a lo largo del tiempo, del mismo modo que un globo puede inflarse o desinflarse sin que cambie su forma básica. Mediante el estudio de la luz que galaxias lejanas emiten hacia nosotros, hay datos convincentes que nos indican que nuestro Universo se halla en expansión. Sin embargo, esto no demuestra que el Universo sea finito, y que se esté inflando como un globo de juguete. Aunque el Universo fuese infinito, tal expansión podría considerarse como un cambio en la distancia media que existe entre los objetos que se hallan dentro del Universo (fig. 1). En cualquier caso, la expansión implica que la escala del Universo fue mucho más pequeña en el pasado, y que los objetos que están en su interior estuvieron antes mucho más próximos entre sí. El astrónomo norteamericano Edwin Hubble, en la década de 1920, fue quien descubrió la expansión del Universo.

Las propiedades del Universo pueden variar también de otro modo. Los recientes descubrimientos efectuados por la física subatómica han llevado a los físicos a pensar que el espacio desprovisto de toda materia observable puede contener —a pesar de todo— una cantidad variable de entidades conocidas como campos cuánticos.

Los campos cuánticos constituyen la versión moderna de los campos clásicos que se habían propuesto en el siglo XIX para dar razón de fenómenos tales como las fuerzas eléctricas y magnéticas. La idea clásica era que una partícula con carga eléctrica producía a su alrededor un campo. Éste, a su vez, producía otro campo ligeramente más alejado de la partícula, que acababa por llegar a la vecindad de una segunda partícula e influía sobre el movimiento de ésta. Tal secuencia de acontecimientos producía el efecto que conocemos con el nombre de fuerzas. De este modo, podía considerarse que las fuerzas sólo tenían efectos locales, y los físicos evitaban la noción de que una partícula actuase directamente sobre otra a gran distancia.

Estos campos clásicos, como todas las propiedades físicas de la física precuántica, poseían un valor numérico definido; en una región del espacio y del tiempo había un campo, o no lo había. Si en una región no actuaban fuerzas de ningún tipo, el campo tenía un valor numérico de cero. Si en la región había fuerzas que actuaban, el campo poseía un valor mensurable distinto de cero, y dicho valor numérico variaba continuamente a través del espacio y del tiempo. Los físicos clásicos creían que todos los acontecimientos del Universo físico resultaban potencialmente mensurables y previsibles.

En la física cuántica la situación no es tan sencilla. Los físicos de hoy sostienen que en la práctica resulta imposible medir con precisión todas las cantidades físicas al mismo tiempo: el conocimiento de determinadas cantidades *veda* el conocimiento de otras. Éste es el contenido general de lo que se conoce con el nombre de principio de incertidumbre de Heisenberg.

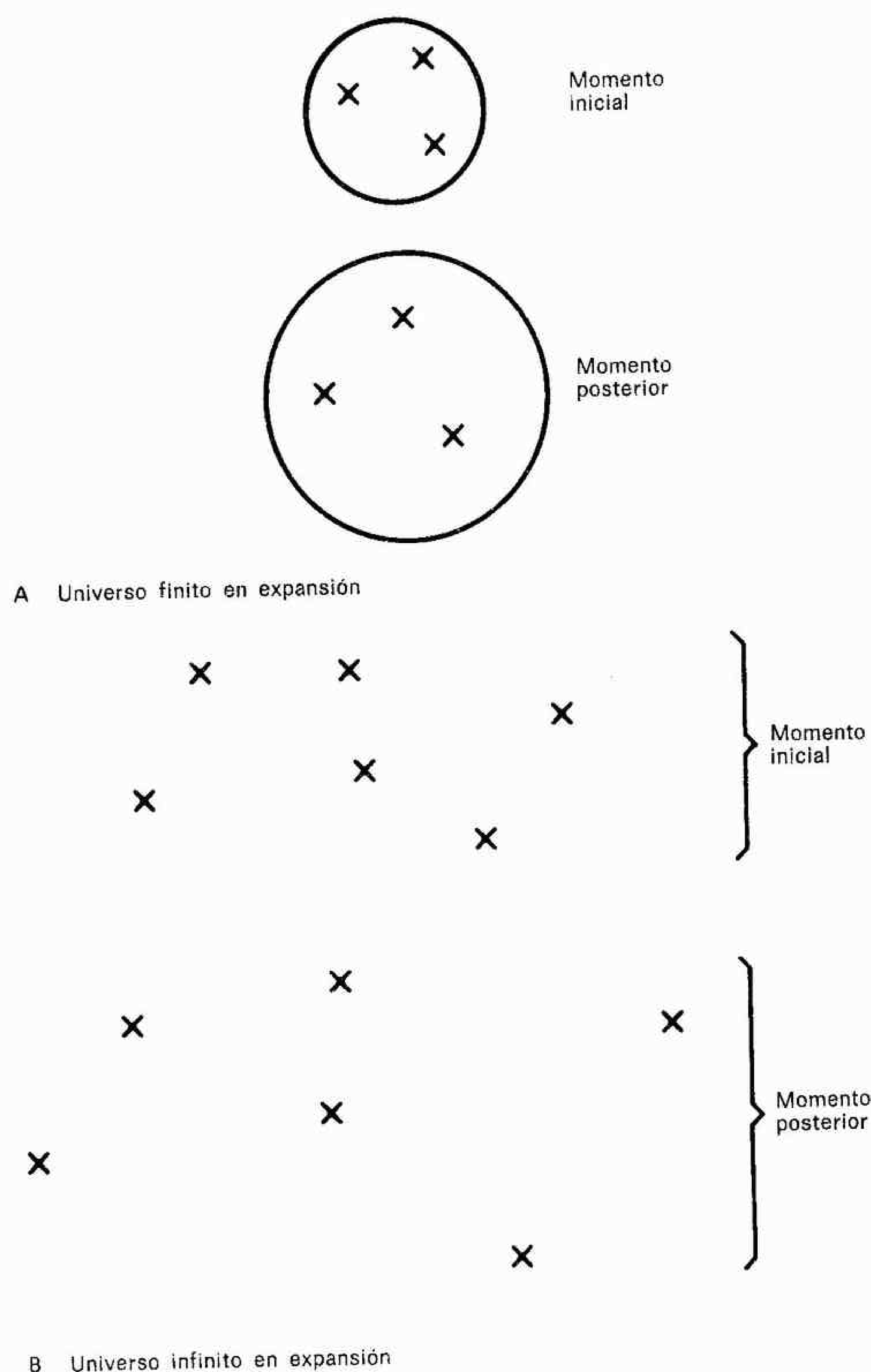


Fig. 1. El Universo en expansión. Tanto un Universo finito —representado por A— como un Universo infinito —representado por B— pueden expandirse, de manera que los objetos que se encuentran en su interior estén cada vez más separados entre sí.

Una de las consecuencias de este principio es que no podemos especificar con precisión qué campos y qué partículas se hallan presentes al mismo tiempo en una región del espacio. Podemos conocer el valor del campo —en cuyo caso no se conoce para nada el contenido de partículas— o podemos conocer qué partículas están presentes y el valor medio del campo en la región, pero no su valor exacto en cada punto. El contenido de partículas y el valor medio del campo suelen ser la descripción más útil.

En esta nueva descripción cuántica de los campos, el campo clásico y las partículas se han unificado en una noción única, el campo cuántico. Cabe afirmar que los campos cuánticos constituyen el núcleo de la realidad, y que todo lo demás es una manifestación de éstos.

El estado del campo cuántico puede compararse con el nivel del agua en el mar. Existe un nivel de referencia, de acuerdo con el cual el agua se distribuye de un modo más o menos uniforme. Sin embargo, cuando sopla el viento en el agua se forman olas, y en los distintos lugares el nivel del agua estará por encima o por debajo del nivel de referencia. Esto corresponde a una situación en la que el campo cuántico está «excitado» en una región del espacio, lo cual se nos aparece como la presencia de una o más partículas subatómicas en esa región.

Dentro de la analogía que estamos empleando, también es posible que el nivel del agua se eleve de manera uniforme en una región muy extensa del mar, como ocurre cuando sube la marea. En este caso no hay olas ni excitaciones locales, pero la distribución del agua —considerada en conjunto— es muy diferente de la que se da cuando baja la marea. Esto corresponde a una situación en la que el nivel medio del campo cuántico en una región del espacio es alto, pero en el cual no hay excitaciones locales que podamos reconocer como partículas subatómicas.

Al igual que un nadador no es consciente del nivel del agua del océano, tampoco nosotros somos conscientes con facilidad del nivel medio del campo cuántico en una región del espacio. No podremos medir el nivel de un campo cuántico determinado a menos que dispongamos de un instrumento de medición que sea sensible al volumen de campo cuántico que hay allí. Tales instrumentos —que son ellos mismos excitaciones de campos cuánticos de diversos tipos— consisten en las partículas

subatómicas. Al igual que podemos medir el nivel del agua en el mar dejando caer un ancla y observando la longitud de la cadena que se necesita para llegar hasta el fondo, se puede emplear la presencia de las partículas subatómicas en una región del espacio para establecer el volumen de los diversos campos cuánticos que existen en esa región del espacio.

Esto puede llevarse a cabo porque las propiedades de las partículas dependen del nivel medio del campo cuántico en el que están inmersas. Varias partículas subatómicas diferentes podrían manifestar propiedades similares en una región del espacio donde exista un determinado nivel cuántico medio. En otra región, donde sea distinto el nivel del campo, las propiedades de las partículas pueden diferir entre sí. Por ejemplo, en nuestra región de espacio-tiempo los electrones y los quarks poseen masas muy diferentes, pero en las condiciones predominantes al comienzo del Universo habrían tenido masas iguales.

Esto se parece al comportamiento de los objetos coloreados cuando son iluminados por distintas calidades de luz. Imaginemos varios objetos semejantes, salvo en que reflejan luz de diferentes colores. Si todos ellos son iluminados con luz blanca —es decir, una mezcla igual de todos los colores—, los objetos aparecerán con un brillo igual. Sin embargo, si son iluminados por luz de un único color —rojo, por ejemplo—, sólo se verán aquellos objetos que reflejen la luz roja; los otros serán invisibles.

Un aspecto de lo que los físicos denominan «simetría rota» es aquella circunstancia en la cual las partículas —que en caso contrario tendrían las mismas propiedades— difieren entre sí por estar inmersas en un campo cuántico. La simetría rota se ha convertido en un factor clave para comprender el funcionamiento de las partículas subatómicas. En vez de tener que estudiar numerosos tipos de partículas, y de introducir una diversidad de propiedades distintas —por ejemplo, diferentes masas— en las ecuaciones que las describen, podemos confiar en que estas diferencias surjan a través de una teoría sencilla, como consecuencia de un entorno asimétrico.

La simetría rota de las propiedades de las partículas es una consecuencia de una simetría rota del campo cuántico subyacente. Las ecuaciones que describen los campos cuánticos se consideran como simétricas: en ellas se dan relaciones matemáticas sencillas entre las ecuaciones que describen campos diferentes, por ejemplo los que están vinculados con los quarks o con los electrones. Sin embargo, los físicos se han dado cuenta, a lo largo de los últimos veinte años, de que muchas de estas ecuaciones tienen soluciones que no son simétricas. Tales soluciones corresponden a los niveles medios del campo cuántico en una región del espacio, diferente para cada campo. Cuando se da esta situación en una región, se dice que se ha roto la simetría de dichos campos. Como estos valores medios del campo influyen sobre las propiedades de las partículas que se hallen presentes en la región, también se observan diferencias entre estas partículas, aunque sean descritas por ecuaciones similares.

Una de las ventajas de emplear ecuaciones simétricas para los campos cuánticos consiste en que suele haber muchas menos teorías simétricas que asimétricas, y las teorías simétricas a menudo tienen propiedades que facilitan su tratamiento matemático.

PARTÍCULAS Y CAMPOS

Lamentablemente, no somos capaces de comprobar la noción de simetría rota cambiando a voluntad el valor de los campos cuánticos existentes en una amplia región del espacio; se requeriría demasiada energía. Es concebible que algún día logremos tal cosa en pequeñas regiones del espacio, a través de colisiones entre núcleos pesados con alta energía. Sin embargo —como ya se dijo antes—, los científicos reconocen que estos cambios en el estado del espacio vacío tuvieron lugar de hecho en el comienzo mismo de la historia del Universo.

Si estuviésemos en condiciones de estudiar esta historia a través de la observación de sus efectos sobre los rasgos del Universo actual, aprenderíamos acerca de las propiedades de las partículas subatómicas bajo condiciones muy distintas a las que podemos producir en nuestros laboratorios. Tal estudio acaba de comenzar, y constituirá una parte importante de la física del futuro. En el capítulo 5 se examinan algunos de sus aspectos. Por el momento, los físicos teóricos han elaborado con cierto detalle la historia de los cambios de fase en el Universo inicial.

Estos primitivos cambios de fase fueron una consecuencia de la rápida expansión del Universo. Durante esta expansión la temperatura del Universo fue disminuyendo de forma continua.

Ocurre algo semejante cuando un gas formado por átomos se expande y se enfría. Como el estado de los campos cuánticos depende de la temperatura, a medida que el Universo se expandía los campos cuánticos que lo ocupaban sufrieron diversos cambios de fase. En estos cambios se modificó de manera brusca el valor medio del campo, lo cual provocó el correspondiente cambio en las propiedades de las partículas que hubiese allí. Por ejemplo, la masa de una partícula que implicaba excitaciones en un campo cuántico específico pudo haber cambiado desde cero hasta un valor muy alto. A medida que tienen lugar los cambios de fase, se produce un complicado intercambio entre la energía del campo, la energía de las partículas y la energía de la expansión del Universo. Esto es parecido a lo que ocurre durante el cambio de fase consistente en la licuefacción de una sustancia corriente, cuando la diferencia de energía entre la forma gaseosa y la forma líquida de la sustancia se libera en forma de calor. La energía liberada a través de los cambios de fase de los campos cuánticos puede desencadenar la creación de partículas, de manera que la cantidad de partículas existentes en el Universo inicial también cambió de forma brusca.

Debido a estos cambios iniciales en las propiedades y en las cantidades de partículas, desde el punto de vista teórico se podrían efectuar diversas listas de tipos de partículas subatómicas existentes en los diversos períodos de la historia del Universo. (Este problema se parece a la confección de una lista de los animales existentes en la Tierra en cada momento: la lista varía mucho a lo largo de la evolución.) La lista más sencilla sería la de aquellas partículas que existían en la etapa más primitiva del Universo, cuando su temperatura general era unas 10^{28} veces mayor que en la actualidad (tres grados por encima del cero absoluto). A esa temperatura tan elevada, el espacio se encontraba en una fase en la que cada campo cuántico —excepto quizás el que estuviese relacionado con la gravedad— tenía un valor mínimo en cualquier punto del espacio. En tal situación no había simetrías rotas. Todas las partículas subatómicas tenían una masa igual a cero, y en consecuencia se desplazaban a la velocidad de la luz.

La cantidad de tipos distintos de partículas que había al principio del Universo —cuando se rompieron las simetrías— era bastante elevada: existían por lo menos 57, y quizá había muchas más. Este cálculo se basa en las partículas similares que sabemos que existen en el Universo actual. Sin embargo, no podemos estar seguros del número original, por una razón que veremos en seguida. En ese momento las diferentes partículas sólo se distinguían entre sí mediante la carga eléctrica —u otras propiedades semejantes a la carga eléctrica— y el espín. En esta etapa inicial del Universo las partículas de cada tipo estaban presentes en cantidades esencialmente iguales, ya que cada tipo se creaba como resultado de las colisiones entre otros tipos, de manera que los equilibrios desaparecerían rápidamente. Esto difiere de la situación actual, en la que la cantidad de partículas de cada tipo es resultado de una historia complicada.

A medida que el Universo continuó expandiéndose y enfriándose, los campos cuánticos pasaron por varias fases distintas de transición. Cada una de las fases condujo a un cambio en el nivel general de por lo menos un campo cuántico en todo el espacio, y al correspondiente cambio en las propiedades de algunas partículas subatómicas. Se piensa que el último de estos cambios de fase tuvo lugar cuando la temperatura del Universo era unas 10^{13} veces superior a la actual. Después de este cambio, todas las partículas subatómicas adquirieron las mismas propiedades que descubrimos en ellas ahora.

De acuerdo con los análisis teóricos, todos estos cambios extraordinarios tuvieron lugar en un período muy corto de tiempo, quizá durante el primer microsegundo después de comenzar la expansión del Universo. En otras palabras, los principales rasgos subatómicos de nuestro Universo quedaron determinados en un solo instante, y sus consecuencias han seguido produciéndose a partir de entonces. Como escribió Omar Khayyam (en traducción de William Fitzgerald): «... La primera mañana de la creación escribió aquello que leerá el último crepúsculo del día del Juicio final.»

Saltemos ahora en el tiempo hasta el Universo actual, unos 15.000 millones de años después del microsegundo que acabamos de describir. Potencialmente continúa existiendo el mismo tipo de partículas, en el sentido de que pueden continuar excitándose los mismos campos cuánticos. No obstante, ahora estas partículas difieren radicalmente entre sí por lo que respecta a sus masas, que en la mayoría de los casos ya no son equivalentes a cero. Este cambio ha provocado notables diferencias en la cantidad de partículas de cada tipo que existen en la actualidad.

Uno de los motivos de esto es que en nuestra «fase» actual las partículas con una masa mayor suelen ser inestables hasta desaparecer; en otras palabras, tienden a transformarse espontáneamente en partículas de una masa inferior. Incluso algunas de las partículas no sometidas a la desaparición debido a lo bajo de su masa —por ejemplo, los electrones— existen en una cantidad relativa muy inferior a la que manifestaron en tiempos pasados. Ello se debe a que la mayoría de los electrones fueron aniquilados hace mucho tiempo junto con sus antipartículas —los positrones— y sólo quedó un exiguo resto de supervivientes. Se considera que las únicas partículas que existen en cantidades comparables a las de la fase inicial del Universo son aquellas partículas que tienen una masa igual a cero o muy próxima a él. Las partículas de este tipo son, por ejemplo, los fotones —aquellas partículas que forman la luz— y tres tipos de partículas eléctricamente neutras, llamadas neutrinos.

Hace mucho que han desaparecido la mayoría de los tipos de partículas que abundaban al comienzo del Universo. Sólo las observamos cuando se producen brevemente en condiciones de laboratorio, y a continuación se aniquilan o desaparecen. Por este motivo no sabemos con certeza cuántos tipos de partículas pueden existir. Las partículas con gran masa y de corta vida no han sobrevivido, y sólo pueden descubrirse si se producen artificialmente. Conocemos varias de tales partículas, por ejemplo los muones, que son semejantes a los electrones, pero con una masa 200 veces superior. Sin embargo, puede haber otros tipos que todavía nos sean desconocidos, y con una masa tan considerable que resulte imposible producirla mediante los aceleradores existentes. Estos tipos de partículas actualmente desconocidos pueden haber existido en gran cantidad al comienzo del Universo. La energía media de las partículas entonces existentes era tan elevada que en las colisiones se podrían haber llegado a producir incluso partículas con una gran masa. Asimismo, partículas que tendrían una masa muy alta si se produjesen hoy podrían haber tenido una masa muy baja o incluso una masa cero al inicio del Universo, porque todavía no habían sucedido algunas transiciones de fase que las dotaron de masa. Algunas teorías con respecto a las partículas subatómicas implican que muchas de estas partículas actualmente desconocidas sí existieron en los albores del Universo. Es posible que algunas de ellas tengan propiedades que les hayan permitido sobrevivir a la desaparición y la aniquilación de la mayoría de sus hermanas, y que perduren como fósiles en el Universo actual. Quizás una búsqueda adecuada nos permita encontrarlas.

EL MUNDO DE LOS QUARKS Y DE LOS ELECTRONES

Algunos de los tipos originales de partículas —los quarks y los electrones— siguen existiendo en nuestro Universo, en cantidades relativamente bajas. Originariamente existía una cantidad de partículas algo mayor que la de antipartículas, y esta pequeña mayoría sobrevivió a la aniquilación. En el Universo inicial existían por lo menos cinco tipos de quarks, pero sólo han sobrevivido dos: los quarks *u* y los quarks *d*. Aunque toda la materia que forman nuestros cuerpos, la Tierra y los astros consiste en quarks y electrones, desde el punto de vista estrictamente cuantitativo, el número de quarks y electrones es sólo una milmillonésima parte de la cifra de fotones y neutrinos existentes. La materia que más nos interesa a nosotros no representa más que una fracción muy pequeña en el equilibrio general de la materia que existe en el Universo.

En el Universo actual los quarks y los electrones tienen propiedades que les permiten constituir los agrupamientos estrechamente vinculados entre sí que denominamos núcleos y átomos. Los fotones y los neutrinos no pueden agruparse así, y por lo tanto existen de una manera mucho más dispersa por todo el Universo. La situación es como si comparásemos células de bacteria con células de elefante. En la Tierra son mucho más numerosas las primeras que las segundas. No obstante, las células de elefante sólo se encuentran en las altas concentraciones que denominamos elefantes, mientras que las bacterias sólo se presentan de forma individual, lo cual nos hace mucho menos conscientes de ellas.

A pesar de todo, la mayor parte del Universo que conocemos está formada por quarks y por electrones, y la imagen del mundo que tenemos en la actualidad es básicamente una manifestación de las propiedades de estas partículas. Los quarks muestran una tendencia a agruparse más notable que la de los electrones. En realidad, dicha tendencia es tan pronunciada que la mayoría de los físicos creen que los quarks nunca se encuentran aislados, sino siempre en combinaciones formadas por tres

quarks o por un quark y un antiquark (la antipartícula de los quarks). Estas combinaciones son las que constituyen la mayoría de las partículas subatómicas que observamos, por ejemplo, los protones y los neutrones, las partículas que hallamos en el núcleo de los átomos.

No se comprenden del todo las razones por las que los quarks insisten en agruparse de este modo. Existe una teoría general —que recibe el nombre de cromodinámica cuántica (CDC)— que trata de describir el comportamiento de los quarks. La CDC versa sobre las interacciones de los campos relacionados con los quarks y de los campos relacionados con otro tipo de partículas llamadas gluones (que reciben ese nombre porque sirven para adherir —*to glue*, en inglés— entre sí a los quarks). La mayoría de los físicos creen que cuando se comprendan mejor las predicciones efectuadas por esta teoría, sabremos por qué los quarks se agrupan de esta forma. Esto constituye un ejemplo de un tipo de problema que se mencionó en la introducción: elaborar con exactitud las consecuencias de una teoría que goza de una aceptación general. Es posible, por ejemplo, que la tendencia de los quarks a agruparse no sea universal. Por lo menos un grupo de físicos ha informado acerca de observaciones referentes a lo que podrían ser quarks aislados, pero tal informe aún no se ha confirmado.

A partir del primer microsegundo después del origen del Universo, los quarks siempre han estado unidos en grupos de tres a los neutrones y a los protones. En las condiciones actuales, todas las demás combinaciones de quarks —quarks *u* y *d*, o de cualquier otro tipo— que puedan ligarse entre sí resultan inestables. En otras palabras, si llegan a producirse, se convierten espontáneamente en partículas dotadas de una masa inferior, y acaban formando una combinación del tipo estable. También los neutrones se muestran inestables cuando se encuentran aislados —por ejemplo, cuando se producen en un reactor nuclear— y en pocos minutos se convierten en protones. El motivo de que en el Universo actual existan protones es que, si tienen la oportunidad necesaria, se unifican en objetos más complejos y perdurables. Los neutrones pueden unirse a los protones en los objetos que conocemos como núcleos atómicos, y también pueden unirse entre sí en cantidades inmensas para formar estrellas de neutrones.

Los electrones, a su vez, se unen con los núcleos y entre sí

para formar las combinaciones que llamamos átomos y moléculas. Esta conexión se realiza mediante fuerzas eléctricas y magnéticas, que constituyen manifestaciones del mismo campo cuántico cuyo aspecto de partícula está formado por el fotón. Las propiedades de este campo se resumen con detalle en una teoría que se conoce como electrodinámica cuántica (EDC), la teoría más ampliamente comprobada de la física cuántica. En ella no se han encontrado inexactitudes superiores a un nivel de error de una milmillonésima.

Basándose en argumentos teóricos, la mayoría de los físicos creen que ni siquiera los protones y las combinaciones de neutrones son en realidad estables, y que una vez transcurrido un tiempo suficientemente largo se convierten en electrones o neutrinos. Aún no se han observado estas desapariciones, si bien se están realizando investigaciones experimentales al respecto. Se cree que esto ocurre después de un lapso igual o superior a 10^{31} años, de manera que pocos de los protones y neutrones producidos al inicio del Universo habrían desaparecido de este modo. Sin embargo, examinando una materia que contenga miles de toneladas de protones, en un año podrían verse desaparecer unos cuantos protones. Según esta teoría, si el Universo continúa expandiéndose durante otros 10^{31} años o más, habrá desaparecido la materia tal como la conocemos. La época en la cual el Universo está dominado por la materia que nos es familiar será muy prolongada, tanto desde el punto de vista humano como desde una perspectiva galáctica, pero quizá sólo sea un instante dentro de la historia completa del Universo.

CÓMO SUCEDEN LAS COSAS EN EL UNIVERSO CUÁNTICO

El comportamiento de los campos cuánticos, de las partículas asociadas con ellos y de todo lo que está formado por estas partículas se rige mediante unos cuantos principios básicos. Tales principios se integran en una teoría general llamada mecánica cuántica relativista, descubierta en un breve período comprendido entre 1925 y 1935. Esta teoría se aplicó en primer lugar a las partículas, y más tarde a los campos. A partir de entonces, los físicos han estado aprovechando el capital intelectual de esa rica década, aplicando los principios de la mecánica

cuántica relativista a diversas entidades, y perfeccionando sus métodos para extraer todas las consecuencias de las nociones básicas de la teoría. No se han hecho necesarias leyes básicamente nuevas para describir ninguno de los fenómenos descubiertos por los físicos a lo largo de los años transcurridos desde entonces.

La mecánica cuántica relativista abarca varios tipos de principios. Básicamente, dicha teoría describe la *probabilidad* de que un tipo cualquiera de medición realizada en un sistema físico dé un resultado determinado. Sólo en casos especiales esta teoría formula una predicción específica sobre los objetos físicos.

Los principios de la mecánica cuántica relativista ponen en relación las medidas efectuadas en determinada condición con las medidas efectuadas en otra condición. Por ejemplo, un principio relaciona los resultados de las mediciones efectuadas en determinado momento dentro de un sistema físico, con las mediciones efectuadas en otro momento. Si la medición realizada en el electrón de un átomo revela una velocidad determinada en un momento dado, entonces la mecánica cuántica relativista predice las probabilidades específicas que tendrá el electrón para manifestar una u otra velocidad un segundo más tarde.

Un rasgo sorprendente de la teoría cuántica es que las mediciones pueden interferirse mutuamente. Para llevar a cabo un tipo de medición quizá sea necesario establecer unas condiciones experimentales que destruyen la información obtenida como consecuencia de una medición anterior. En el ejemplo que acabamos de exponer, la medición exacta de la velocidad del electrón destruiría necesariamente cualquier información previa sobre el lugar que ocupa dicho electrón. La causa de esto es que cualquier método que permita medir la velocidad de un objeto cambia obligadamente —y de un modo imprevisible— el lugar que ocupa el objeto. Por ejemplo, si medimos la velocidad de un electrón empleando una especie de radar —que envíe luz al electrón, lo cual permita observar el cambio en la longitud de onda de la luz reflejada—, el efecto de la luz cambiará la colocación del electrón de un modo imposible de prever. Este tipo de interferencia entre mediciones es un elemento clave del principio de incertidumbre de Heisenberg, que pone límites a la precisión con que podemos conocer el estado presente de un sistema físico, y que por lo tanto limita también la precisión con que podamos predecir su comportamiento futuro (fig. 2). En lo

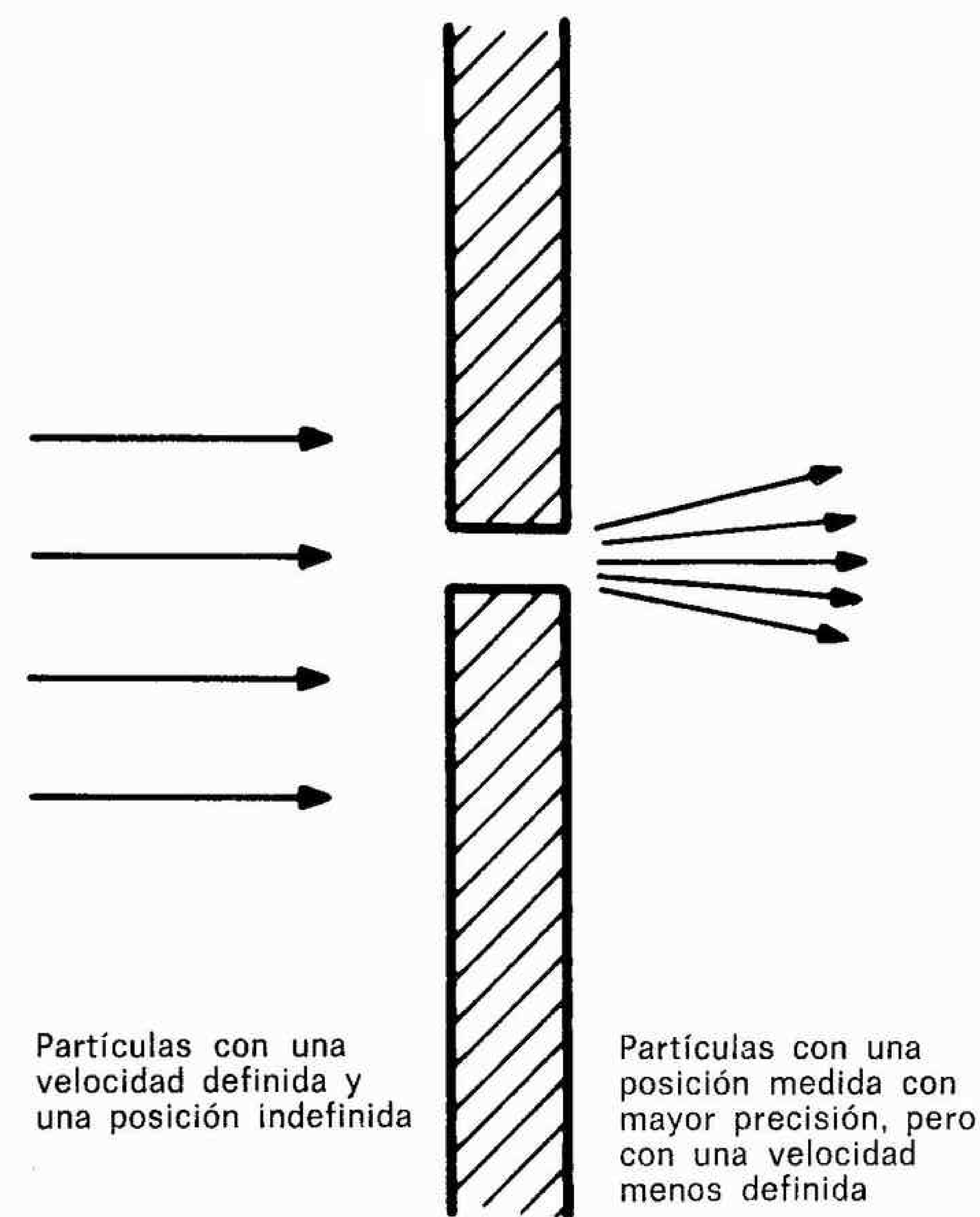


Fig. 2. Principio de incertidumbre de Heisenberg. Un dispositivo de medida, por ejemplo, el pequeño orificio practicado en la pantalla, que nos brinda un mayor conocimiento con respecto a la posición de las partículas de un haz, provoca una disminución del conocimiento acerca de las velocidades de estas mismas partículas, debido a la interacción entre dicho dispositivo y las partículas.

referente a los objetos cotidianos, las limitaciones establecidas por el principio de Heisenberg son demasiado pequeñas para adquirir relevancia, pero resultan decisivas en el caso de los átomos y de las partículas subatómicas.

De manera paradójica, esta incertidumbre misma ha llevado a formular ecuaciones que en ciertas circunstancias son mucho más precisas que las utilizadas por los físicos clásicos, que tanto confiaban en la previsibilidad de las leyes naturales. Estas ecuaciones cuánticas a veces implican que una magnitud física —como, por ejemplo, la energía— siempre tendrá un valor numérico perteneciente a un conjunto muy reducido, y no un valor arbitrario. Una de las formas en que se pueden obtener las ecuaciones matemáticas de la teoría cuántica consiste en tomar un conjunto ya existente de ecuaciones pertenecientes a una teoría precuántica, y modificarlo de una forma que permita incluir la mutua interferencia de mediciones. Las ecuaciones modificadas describen el mismo fenómeno que las ecuaciones clásicas; la diferencia está en que las ecuaciones de la mecánica cuántica son correctas.

Una consecuencia específica de aplicar este proceso a las ecuaciones que describen los campos clásicos consiste en considerar las partículas subatómicas como excitaciones de campos cuánticos. Las ecuaciones cuánticas poseen soluciones que sirven para describir las propiedades exclusivas de los principios subatómicos —por ejemplo, la carga eléctrica y el espín establecidos con exactitud—, cosa que no podían lograr las ecuaciones referentes a los campos clásicos. (Prácticamente hasta hace muy poco tiempo no se ha descubierto que estas ecuaciones de los campos cuánticos también tienen otras soluciones que permiten describir objetos nuevos y distintos de las partículas subatómicas.)

Es posible invertir el proceso que acabamos de describir. Se puede empezar con las propiedades de las partículas subatómicas, e introducir los campos cuánticos en cuanto una adecuada descripción matemática de estas partículas. Durante muchos años esta visión alternativa —según la cual las partículas constituían la realidad primaria y los campos no eran más que un artificio matemático— fue aceptada por la mayoría de los físicos, incluido yo mismo. Hace poco, sin embargo, el concepto de simetría rota —que se basa en la noción según la cual los campos cuánticos se hallan presentes en todo el espacio— ha modificado esta actitud, y ha llevado a numerosos físicos a pensar que los campos son la manifestación primaria, y las partículas, una manifestación secundaria. El balanceo de este péndulo entre el campo y las partículas es sólo un aspecto más de un balanceo

más amplio entre la continuidad y la oposición, presente en la teoría física desde hace dos mil años.

El hallazgo de la mecánica cuántica relativista exigió un esfuerzo concertado para incorporarla a las exigencias de la teoría especial de la relatividad de Einstein, que establecía la relatividad del espacio y del tiempo. Cuando se imponen tales exigencias, conducen a fórmulas matemáticas que relacionen las mediciones efectuadas dentro de un mismo sistema físico por observadores diferentes, por ejemplo, uno en la Tierra y otro en una nave espacial que se desplaza a una velocidad constante. Estas relaciones matemáticas limitan de manera notable la forma que puede asumir una teoría cualquiera, porque la mayoría de teorías imaginables no serán coherentes con dichas relaciones. Un ejemplo espectacular de ello fue la conclusión según la cual se determinó —hace ya 50 años— que toda teoría que describa los campos cuánticos y que satisfaga los requisitos de la relatividad especial permite necesariamente la creación y la destrucción de partículas de un tipo a través de los otros tipos. Esta predicción se formuló en el momento oportuno para dar razón de la amplia variedad de fenómenos de creación y destrucción de partículas que se han observado en los laboratorios durante los últimos 50 años.

Muchos físicos creen que si la forma existente de mecánica cuántica relativista se ampliase para incluir en ella las exigencias de la otra gran creación de Einstein —la relatividad general, que describe la influencia de la aceleración sobre las observaciones— se produciría una considerable desviación con respecto a la descripción del espacio-tiempo que se emplea en la actual mecánica cuántica relativista. La mayoría de los físicos cree ahora que la relatividad general es primordialmente una teoría de la gravedad, una de las formas en que las partículas —o las cosas constituidas por éstas— pueden influirse recíprocamente. La gravedad también desempeña un papel especial en la naturaleza, porque en cierto sentido su efecto es universal, y afecta a todo de un modo semejante. Una muestra de tal universalidad fue el descubrimiento de Galileo de que todos los cuerpos caen hacia tierra con una aceleración aproximadamente igual. El influjo de la gravedad afecta incluso a los instrumentos con que medimos la distancia y el tiempo, llevando a la curvatura del espacio-tiempo descubierta por Einstein. Por ejemplo, dos relojes iguales —uno de ellos colocado en la Tierra, y el otro, cerca de

la superficie de una estrella de neutrones— funcionarían a un ritmo muy distinto.

¿Qué ocurre, sin embargo, con los efectos de la gravedad sobre regiones muy pequeñas, cuyo tamaño sea igual o inferior a 10^{-33} centímetros? Ahora estamos examinando distancias que mantienen la misma proporción (10^{-20}) con respecto al tamaño de un protón —considerado como algo pequeñísimo— que la relación que existe entre el tamaño de un protón y el de una gran montaña. A estas distancias diminutas, los efectos de la teoría cuántica sobre la gravedad se vuelven importantes, aunque los físicos no han sido capaces de formular una teoría que describa lo que ocurre. En efecto, ellos creen que una teoría de esta clase describiría unas propiedades del espacio-tiempo radicalmente diferentes a las que existen en las regiones mucho mayores, que se han estudiado hasta el momento. Ésta es una de las áreas en las cuales los científicos esperan efectuar progresos significativos en el futuro. Volveré sobre la cuestión en el capítulo siguiente.

En su forma actual, la mecánica cuántica relativista no es una teoría física completa. Entre otras cosas, una teoría completa tendría que determinar qué entidades existen realmente en el Universo y especificar el comportamiento de estas entidades existentes. La teoría de que disponemos no lleva a cabo esta labor. En el momento actual los físicos se dedican a añadir a los principios básicos de la teoría una lista elaborada empíricamente de aquellas entidades a la que habría que aplicarla. Una manera de hacerlo consiste en enumerar todas las partículas subatómicas conocidas, junto con aquellas que se cree que existen, pero que todavía no se han descubierto. Estas últimas podrían incluir también las partículas que ahora poseen una masa demasiado elevada como para producirlas en condiciones de laboratorio, pero que existieron al principio del Universo. Una manera más efectiva de describir los objetos a los cuales se aplica la mecánica cuántica relativista consiste en hacer una lista de los tipos de campos cuánticos, dado que las propiedades de los campos —durante la evolución del Universo— cambian menos que las de las partículas, y porque los físicos piensan ahora que los campos son las entidades más fundamentales.

La lista incluye aquellos campos que dan razón de las partículas conocidas, y también otros campos cuya existencia hemos de suponer debido a un importante aspecto de nuestra descripción de las partículas y de los campos: la llamada simetría interna. Una simetría interna consiste en una formulación matemática que relaciona las propiedades de las diferentes entidades en el mismo punto del espacio-tiempo. Por ejemplo, una simetría de esta clase podría afirmar que el campo cuántico empleado para describir a los electrones satisface las mismas ecuaciones que el campo empleado para describir uno de los tipos de quark. Las relaciones hipotéticas de esta clase son las que han conducido hasta las teorías que afirman que los protones a veces se transforman en positrones. Las simetrías internas se distinguen de las simetrías de espacio-tiempo como las supuestas por la teoría de la relatividad, que relacionan entre sí a campos situados en diferentes puntos del espacio-tiempo.

En ciertos casos ya se sabe que existen todos los objetos cuyas propiedades quedan relacionadas por la formulación matemática de una simetría interna específica, y no es necesario suponer la existencia de entidades adicionales. Un ejemplo de ello consiste en la simetría que relaciona un campo de quark con el campo del electrón. En otros casos, para que en la naturaleza se aplique una simetría interna, los campos cuánticos aún no descubiertos tienen que existir, además de aquellos ya conocidos. La lógica de este argumento es semejante a la que se utiliza para deducir la existencia del volumen 23.° de una enciclopedia, a partir de la observación de los volúmenes comprendidos entre el 1.° y el 22.° y entre el 24.° y el 30.°. En muchos casos los físicos están convencidos de que es aplicable una simetría interna, estudiando las partículas conocidas y comparando sus propiedades con las que habían sido previstas por la simetría. Basándose en esta confianza acerca de la verdad de la simetría en la naturaleza, este argumento puede emplearse a continuación para predecir la existencia de campos previamente desconocidos, y de sus correspondientes partículas.

En las últimas décadas se han hecho varias predicciones de esta clase. Por ejemplo, a principios de la década de 1960, el físico teórico norteamericano Murray Gell-Mann —con base en una simetría interna que parecía aplicarse a varias de las partículas que entonces se conocían— infirió que tenía que existir una partícula desconocida en ese momento, con determinadas propiedades de espín, carga y masa. Su predicción condujo al descubrimiento de dicha partícula en 1964: el omega-menos. La utilización de simetrías internas continúa siendo una de las me-

jores herramientas de que disponen los físicos teóricos para prever nuevos descubrimientos.

Desde un punto de vista ideal, cabe esperar que nos topemos con un principio de simetría interna que resulte tan omnicomprensivo que determine cuáles son todos los tipos existentes de campo cuántico. Los físicos que trabajan en torno a este problema utilizan ampliamente una rama de la matemática que se llama teoría de los grupos. Un grupo es una reunión de objetos matemáticos —los miembros del grupo— y un conjunto de reglas que describen la forma en que pueden combinarse dos miembros cualesquiera para producir un nuevo miembro. Estas reglas combinatorias son las que sirven para distinguir los grupos entre sí. Pueden aplicarse las mismas reglas a conjuntos muy diferentes de objetos: números, figuras geométricas o campos cuánticos. Cada aplicación de este tipo brinda una ilustración diferente de lo que los matemáticos consideran como un mismo grupo, de un modo parecido a como distintas familias pueden ilustrar unas mismas reglas para determinar las relaciones de parentesco. Los matemáticos han estudiado con gran detalle las propiedades de los grupos, y los físicos disponen de mucha información al respecto. (En física los grupos no se utilizan únicamente para describir simetrías internas. Por ejemplo, sirven para establecer con precisión la relación existente entre observaciones efectuadas por dos personas que se hallan en movimiento relativo.)

Cuando los físicos emplean la teoría de los grupos en la teoría del campo cuántico, puede considerarse que cada miembro del grupo es una relación matemática específica entre las propiedades de varios campos cuánticos. Por ejemplo, un miembro de un grupo podría ser la operación matemática que convierte un campo de electrón en un campo de neutrino, y viceversa. Si los físicos supiesen qué grupo correspondía a la simetría interna de los campos cuánticos, estarían en condiciones de decir muchas cosas con respecto a los campos cuánticos que existen. Esto se debe a que, en un grupo determinado, las relaciones matemáticas que son sus miembros deben aplicarse a un número específico de campos. Podemos afirmar que cada grupo corresponde a una cantidad diferente de ranuras que pueden ser ocupadas por campos cuánticos. Y si supiésemos qué campos existen, entonces podríamos decir algo con relación a las partículas que existen.

Por ejemplo, la cromodinámica cuántica —la teoría que relaciona la interacción de los campos de quarks y los campos de gluones— se basa en un grupo específico que se supone que describe algunas de las propiedades de los quarks. Las reglas combinatorias de este grupo exigen que los quarks existan en múltiplos de tres. Ninguna otra constelación de quarks podría satisfacer las reglas en cuestión. Este tipo de restricción de las posibilidades físicas —como resultado de la aplicación de matemáticas específicas— no es algo nuevo en física. Se trata de algo análogo a la demostración de Isaac Newton de que la aplicación de su ley de la gravedad al Sistema Solar involucraba que la órbita de un objeto sólo podía ajustarse a una de estas tres posibilidades: una elipse, una parábola o una hipérbola.

El grupo utilizado para describir los quarks fue introducido después de saber que los quarks aparecen en grupos de tres, de manera que la existencia de quarks en grupos de tres no constituía una predicción. En otros casos, los físicos postulaban en primer lugar que un grupo determinado era el idóneo, y a continuación lo examinaban para ver qué combinación de campos y partículas permitía que existiese. Hay que advertir que, actuando de esta forma un tanto fortuita, los físicos han podido establecer algunas de las simetrías internas de la naturaleza. Sin embargo, hasta que tengamos un principio general que determine cuáles son los grupos de simetría interna que se aplican a la física, en este enfoque habrá un elemento empírico inevitable para determinar qué es lo que existe realmente en la naturaleza. La teoría, por lo tanto, no estará completa en el sentido descrito más atrás. Éste es uno de los campos de investigación más activos en la física de las partículas que se lleva a cabo hoy día.

QUÉ NOS PERMITE COMPRENDER LA FÍSICA DE LAS PARTÍCULAS

La física consiste en un conjunto de principios que son ampliamente aplicables a un conjunto de objetos fundamentales. Toda ciencia tiene que enfrentarse con una pregunta esencial: ¿en qué medida los fenómenos que se hallan dentro de su ámbito pueden entenderse de manera adecuada efectuando inferencias a partir de los principios fundamentales de dicha ciencia? En el caso de la física, el interrogante asume la forma si-

guiente: ¿en qué medida se podrán comprender las propiedades y el comportamiento conocidos de la materia, aplicando las leyes de la mecánica cuántica relativista a los campos cuánticos y a sus manifestaciones mediante partículas?

La respuesta: en una medida muy notable. La mayoría de las propiedades conocidas de la materia —tanto en las condiciones que se dan en la Tierra como en las que prevalecen en otras partes del Universo— tienen explicaciones teóricas. Quizá la excepción esté constituida por los fenómenos que se supone que ocurrieron en los instantes iniciales del Universo, y por los fenómenos inaccesibles que tengan lugar dentro de los agujeros negros. Para describir ciertos aspectos del comportamiento de la materia en general, en algunos casos es necesario realizar suposiciones adicionales que no se pueden deducir de los principios básicos, aunque haya razones para pensar que en definitiva podría efectuarse tal deducción. Por ejemplo, no se ha demostrado de forma concluyente que la configuración de materia que reconocemos como cuerpo sólido es la disposición más estable de una reunión de átomos a bajas temperaturas. Tendría que ser posible demostrarlo aplicando los principios de la mecánica cuántica relativista a los electrones y los núcleos que forman los átomos, pero a ello se oponen graves problemas matemáticos. Sin embargo, los físicos han avanzado mucho en la comprensión de la conducta de los cuerpos sólidos, suponiendo que son estables en realidad, y a continuación estudiando cómo se aplica a ellos la teoría cuántica.

Por ejemplo, la forma en que los metales y otros materiales sólidos conducen el calor y la electricidad puede entenderse a la perfección aplicando la teoría cuántica a la conducta de los electrones que se hallan en el interior del sólido. El misterioso comportamiento del helio líquido a muy bajas temperaturas —fluye sin la menor resistencia, incluso por encima del borde de un recipiente— puede comprenderse mediante la aplicación de la teoría cuántica a los átomos de helio. Las propiedades del núcleo atómico —que antes se consideraban fuera del alcance de la teoría cuántica— han permitido una combinación de modelos sencillos sobre cómo los neutrones y los protones del núcleo se influyen entre sí, y una aplicación de la mecánica cuántica relativista a dichos modelos. La manera en que los diversos cuerpos emiten y absorben la luz ha sido comprendida gracias a la aplicación de la mecánica cuántica relativista a los fotones

que forman la luz y a los átomos que constituyen los cuerpos. En cada una de estas aplicaciones fue necesario introducir determinadas aproximaciones matemáticas, para que los fenómenos pudiesen someterse a nuestra limitada capacidad matemática.

Esto sirve de ejemplo de un problema general que surge al tratar de hacer física «desde la base». Aunque se entiendan a la perfección los principios básicos de determinado campo intelectual, suelen plantearse problemas al aplicarlos a fenómenos complejos. La mecánica cuántica relativista puede utilizarse con comodidad para comprender las propiedades de los átomos sencillos y de las moléculas, pero se vuelve enormemente difícil aplicar esta teoría de forma directa a objetos con una complejidad moderada, por ejemplo, las macromoléculas que resultan de tanto interés para los biólogos, o incluso los grupos formados por unos cuantos átomos. El problema no reside en los objetos, sino en nosotros mismos: en este momento no somos capaces de extraer las necesarias inferencias de los principios básicos. Lo que acostumbramos hacer, en cambio, es elaborar modelos sencillos de los sistemas complejos, y que consideremos coherentes con los principios básicos. A continuación, con la ayuda de tales modelos, razonamos acerca de los fenómenos que deseamos comprender.

Un ejemplo de esta metodología es el modelo de moléculas complejas elaborado por los bioquímicos, donde los átomos que están formando las moléculas se representan como esferas sin rasgos característicos, con «ganchos» salientes que permiten que las esferas se unan mediante enlaces químicos. Este modelo ha tenido mucho éxito en la representación de buena parte de la conducta conocida de las moléculas orgánicas, pero no puede considerársele como algo parecido a la manera en que la mecánica cuántica relativista describiría esas mismas moléculas. No hay nada erróneo en el empleo de esos modelos, pero para que la ciencia sea lo que deseamos —dentro de la malla inconsútil de la explicación— será necesario llenar las lagunas existentes entre las modalidades de explicación utilizadas por los científicos que trabajan a diferentes niveles de complejidad, como, por ejemplo, los físicos que estudian las partículas y los químicos orgánicos.

Hasta cierto punto, la aplicación de la mecánica cuántica relativista a la comprensión de fenómenos de una escala superior

a la subatómica ha tenido éxito. Cuando no ha sido así, ello se debe probablemente a las leyes no conocidas, más que la complejidad del problema. A veces lo único que ocurre es que hay demasiadas cosas que aspiran a que las desvelemos, utilizando los métodos de que disponemos en la actualidad. Una de las tareas importantes de la ciencia futura consiste en el desarrollo de nuevos modelos para hacer posible tal objetivo.

2. UNA TEMIBLE MULTIPLICIDAD: LA CIENCIA DE LA VIDA

La tarea de los biólogos consiste en entender cómo son los seres vivientes: su estructura, su conducta y su constitución. Con más fidelidad que los físicos, los biólogos han obedecido la consigna de Francis Bacon sobre la manera de avanzar en la ciencia. Los biólogos suelen comenzar por los fenómenos observables en la vida, y a continuación formulan teorías que abarcan la mayor cantidad posible de fenómenos. Rara vez emiten teorías sobre posibilidades desconocidas.

Por ejemplo, los biólogos no se han esforzado demasiado por prever la existencia de seres vivientes diferentes a los que han sido observados. Por supuesto, en biología se producen generalizaciones, tales como las nociones de evolución y de selección natural, que han transformado nuestra manera de pensar en biología y en otras ciencias. Sin embargo, hasta nociones tan poderosas como la de evolución se han empleado por lo general para dar cuenta de fenómenos conocidos, y no para predecir novedades. Ésta es la razón por la cual este resumen de lo que los biólogos conocen en la actualidad consiste primordialmente en una descripción de fenómenos conocidos, y de la forma en que se estudian y se comprenden.

BAJO LA DIVERSIDAD ENTRE LOS SERES VIVIENTES SUBYACE UNA ESTRUCTURA SEMEJANTE

Quizá lo que más llame la atención en los seres vivientes que hay en la Tierra es su diversidad. Existen millones de especies,

cada una de ellas con distintas características. En las criaturas multicelulares, hasta los diferentes miembros de una misma especie son individuos con sus propias peculiaridades. No sorprende que esta percepción de la diversidad constituya nuestra respuesta innata a los seres vivientes. Durante la mayor parte de la historia humana, nuestras vidas han dependido estrictamente de nuestra capacidad para distinguir entre lo que podemos comer y lo que nos puede comer a nosotros.

Como resultado de un estudio prolongado, los biólogos han llegado a la convicción de que, bajo la diversidad de la vida, subyacen unas semejanzas fundamentales entre todos los seres vivientes que conocemos. Un pequeño número de sustancias químicas, y una cantidad algo mayor —pero siempre reducida— de reacciones entre tales sustancias, forman la base de toda la estructura y el comportamiento de los seres vivientes. La diversidad de la vida es algo análogo a las muchas composiciones musicales diferentes que pueden efectuarse a partir de un pequeño número de notas y acordes. Tal diversidad no surge de diferencias en la estructura básica de los componentes individuales últimos de los seres vivientes. Indica, más bien, la inmensa cantidad de patrones distintos que pueden aparecer gracias a la combinación de un gran número de copias de unos cuantos objetos distintos.

Este proceso se da a varios niveles diferentes de la estructura característica de los seres vivientes. En el nivel más primitivo, todas las moléculas que se hallan en los seres vivientes son combinaciones de un pequeño número de átomos: básicamente, carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre. Con estos átomos pueden formarse incontables billones de pequeñas moléculas diferentes. No obstante, la vida en la Tierra sólo utiliza una minúscula fracción de estas posibles moléculas —probablemente no más de unos cuantos millares— para llevar a cabo toda su química. El hecho de que toda la actividad vital se origine a través de una combinación de este pequeño número de moléculas no tiene por qué resultar sorprendente: todas las maravillas del color pueden surgir gracias a la combinación de tres tonos primarios.

Un número aún menor de estas biomoléculas —unas 25— forman la base de dos importantes tipos de polímeros moleculares: las proteínas y los ácidos nucleicos. Veinte aminoácidos diferentes —en diversas combinaciones— se unen para formar

las proteínas. Éstas actúan como catalizadores, posibilitando que la mayoría de las reacciones bioquímicas tengan lugar a un ritmo lo bastante notable como para que funcionen los seres vivientes.

En su estado biológicamente activo, las proteínas adquieren complejas formas tridimensionales. Son precisamente estas formas las que permiten que las proteínas actúen como catalizadores. Sin embargo, aún no se ha comprendido del todo la manera en que las series de aminoácidos determinan la estructura tridimensional de las proteínas. Éstas también realizan otras funciones en los seres vivientes, entre las que se cuentan formar parte de las estructuras que otorgan a cada ser vivo su estructura característica, y separarlo del medio ambiente. Tampoco ha aclarado del todo la forma exacta en que la serie de aminoácidos permite que una proteína específica lleve a cabo tales funciones.

Los otros polímeros moleculares fundamentales son los ácidos nucleicos: el ADN y el ARN. Las unidades del ADN son conjuntos de cuatro bases, moléculas orgánicas relativamente sencillas, llamadas adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). En el ARN una quinta base, el uracilo (U), sustituye a la timina. Las bases se enhebran en una larga serie formada por moléculas de azúcar y de fosfatos, como si fuesen cuentas de un collar (fig. 3). El ADN y el ARN también forman complejas con-

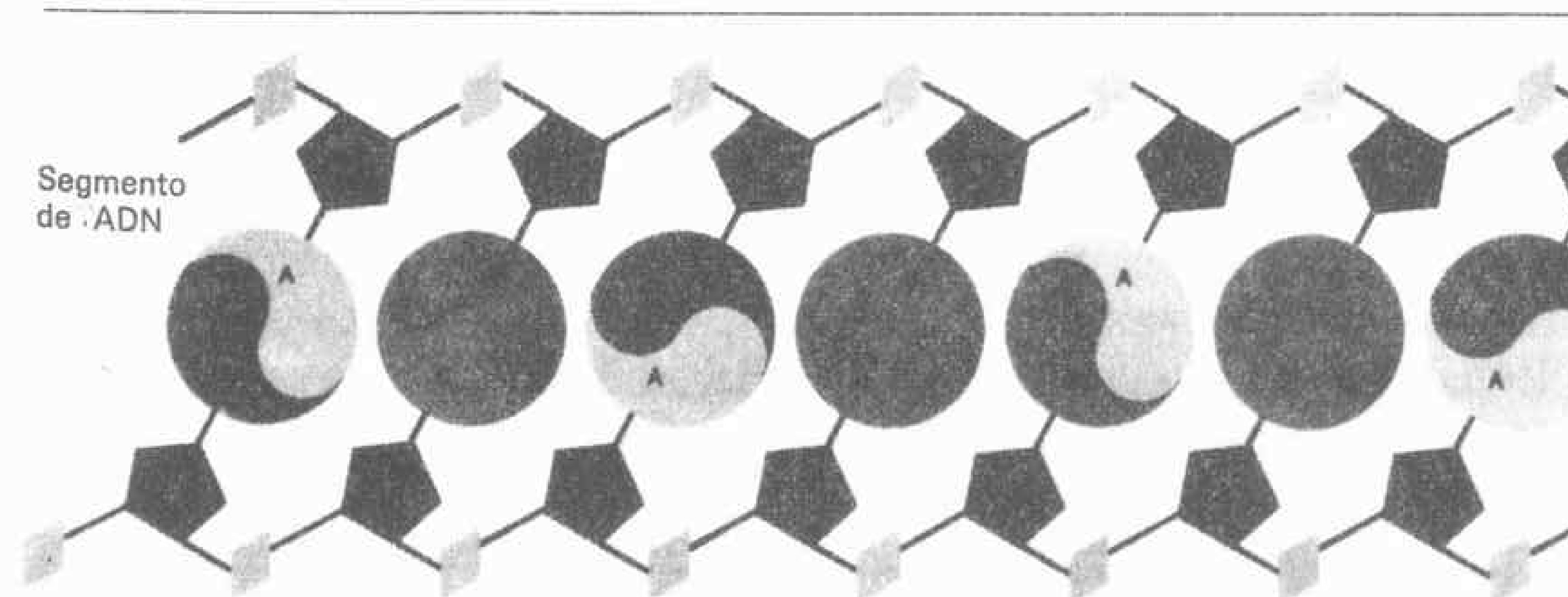


Fig. 3. Un modelo de ADN. La cadena de fosfatos y de azúcares de cada lado se sitúa en el exterior, mientras que las bases —A, C, G y T— se sitúan en el interior, unidas a las dos cadenas externas de acuerdo con la regla A-T, G-C.

figuraciones tridimensionales en sus formas biológicamente activas, y dichas configuraciones desempeñan un papel importante en las actividades biológicas. En la mayoría de los seres vivos celulares, una de las formas del ácido nucleico —el ADN— se utiliza para el almacenamiento de información; la otra forma, el ARN, para la transferencia de información y la producción de proteínas. Las reglas para transformar una secuencia de bases en una secuencia de aminoácidos parecen ser casi universales, y su dilucidación ha constituido uno de los mayores avances en la historia de la biología. El hecho de que entre la información genética y su realización proteínica haya dos pasos —y no sólo uno— permite unos elaborados procesos de control, que determinan cómo y cuándo se expresa esta información. Estos mecanismos de control desempeñan un papel importante en los procesos vitales de los organismos complejos, y los biólogos están empezando ahora a comprenderlos.

Se ha calculado que el ADN del núcleo de una célula integrante de un organismo complejo —por ejemplo, un ser humano— contiene la información requerida para la construcción de muchos miles de proteínas distintas. Muchas de las proteínas que se producen son las mismas en todos los organismos. Diferentes ejemplos de un mismo organismo, o incluso diferentes organismos dentro de una misma clase —por ejemplo, los hombres y los chimpancés—, suelen tener series de ADN muy semejantes, en las que sólo difiere un porcentaje muy reducido de las bases. Una pequeña variación en las proteínas alcanza para producir las grandes diferencias que hay entre dos personas, o entre los hombres y los monos. La causa de que una pequeña variación en las unidades —moléculas en un caso, células en el otro— provoque una gran diferencia en los resultados finales hay que atribuirla a la extraordinariamente compleja estructura de interacciones entre las moléculas de una célula, y entre las células de un organismo. La interacción recíproca de unos cuantos tipos de unidades constituye el mecanismo subyacente en la diversidad de seres vivientes.

Las semejanzas entre los seres vivientes van más allá de su estructura química. Toda la vida conocida está formada por una o varias unidades celulares. Estas células consisten en proteínas y ácidos nucleicos estrechamente vinculados entre sí, rodeados por algún tipo de envoltura a modo de membrana, que mantiene unida la célula e impide que se introduzca en ella la mayor

parte del entorno. La membrana celular no es completamente impermeable; si lo fuese, la célula no podría ingerir la necesaria energía procedente del exterior, ni excretar sus productos de desecho.

Las sustancias internas de la célula no están ordenadas del mismo modo en todas las formas de vida. En los procariotas —una numerosa clase de seres vivos simples, que incluye las bacterias— el ADN no está aislado del resto del contenido de la célula por una envoltura. En los eucariotas —otra amplia clase, que incluye todas las criaturas multicelulares— la mayor parte del ADN de la célula se encuentra en una estructura que posee unos rasgos característicos: el núcleo, parcialmente segregado del resto de la célula mediante su propia membrana. En el núcleo también hay proteínas y ARN, combinados con el ADN a través de complejas estructuras que son decisivas para el funcionamiento de los organismos eucarióticos. En las células de todos los seres vivientes también se encuentran otras estructuras, llamadas ribosomas. Son las «fábricas» donde se sintetizan las proteínas de acuerdo con los programas contenidos en los ácidos nucleicos.

Las células más sencillas son capaces de realizar muchas de las actividades químicas básicas que llevan a cabo las células más complejas. Toda célula viva tiene que efectuar unas funciones determinadas. Entre éstas hay que mencionar: producir las proteínas que necesita a partir de los aminoácicos, transferir información desde el ADN a las proteínas y duplicar el propio ADN cuando la célula se divide. Las estructuras internas de la célula y la secuencia de operaciones que sirve para llevar a cabo esta tarea son casi idénticas en todas las células. Las diferencias entre los seres vivientes simples y los complejos consisten principalmente en las instrucciones más elaboradas que están codificadas en el ADN de los organismos complejos, que les permiten producir una diversidad de proteínas más amplia que la de los organismos más simples. Además, los organismos complejos suelen tener muchos tipos diferentes de células que no sólo realizan las tareas generales características de todas las células, sino que se especializan en efectuar distintas funciones químicas y físicas.

Todas las formas de vida que conocemos involucran una diferente configuración de una misma noción básica: la simbiosis entre ácidos nucleicos y proteínas. Las configuraciones poseen

en sí mismas un gran interés, porque los seres humanos constituyen en sí mismos una elaboración de esta clase. Al igual que los físicos no siempre son capaces de comprender el funcionamiento de los complejos sistemas compuestos de partículas subatómicas, aunque conozcan las leyes que rigen las partículas individuales, también los biólogos sólo han logrado parcialmente traducir lo que saben acerca de la conducta y la estructura de las células individuales en una interpretación general acerca de lo que hacen los organismos complejos.

CÓMO HA SURGIDO LA DIVERSIDAD

A lo largo de la historia de la vida sobre la Tierra han existido millones de especies diferentes, y dentro de cada especie ha habido una cantidad enorme de individuos, relacionados mediante ciertos rasgos esenciales, pero con muchos aspectos diferentes. Sin embargo, esta diversidad se encuentra muy lejos de agotar las posibilidades viables que pueden surgir gracias a la combinación recíproca de las sustancias bioquímicas básicas, de igual manera que los millones de libros que existen en la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos tampoco están cerca de agotar la variedad posible de frases que poseen un sentido dentro de la lengua inglesa.

En la comprensión de la diversidad biológica se plantean dos problemas distintos. Uno de ellos es el problema mecánico, es decir, cómo pueden interpretarse las diferencias de forma desde el punto de vista de las propiedades y la conducta de las moléculas de ácido nucleico y de proteína que se encuentran presentes. El otro problema es la cuestión de los orígenes, es decir, cómo surgió esta diversidad. Es presumible que la vida en la Tierra haya comenzado por seres vivientes simples, y que evolucionase a lo largo de un lapso de varios miles de millones de años hasta llegar a organismos cada vez más complejos.

Charles Darwin y Alfred Wallace fueron quienes contestaron esencialmente la pregunta referente a cómo apareció la diversidad de la vida sobre la Tierra. La diversidad actual se ha producido a través de la amplificación de numerosas pequeñas diferencias, llamadas variaciones, a lo largo de inmensos períodos de tiempo. Organismos muy semejantes pueden tener vástagos que difieran de algún modo, y a lo largo de muchas generaciones tales diferencias pueden aumentar de modo que los descendientes ya no formen parte de una única especie. Esto ocurre con la máxima facilidad cuando existen varios grupos de organismos que se reproducen de manera aislada unos de otros. No se conoce con precisión cuál es la escala temporal a la que aparecen tales grandes diferencias, y la cuestión provoca cierta controversia entre los biólogos, pero no hay duda de que la descripción general es correcta.

Darwin no sabía qué era lo que causaba estas variaciones entre los distintos organismos de una especie. Con nuestro actual modelo acerca de cómo se almacena la información genética, conocemos muchas de las formas en que surgen las variaciones, como resultado de las influencias ambientales sobre el material genético del organismo, y de los cambios genéticos que surgen dentro del propio organismo.

El medio de amplificar este proceso fue lo que Darwin denominó selección natural. A través de ésta, tienden a acumularse las variaciones que permitan un mayor éxito reproductivo dentro de un entorno específico. Aparece una gradual variación en la dirección de una población formada por organismos con un conjunto de características que otorguen un mayor éxito reproductivo dentro de ese medio ambiente.

Esto —en sí mismo— no justifica una extremada diversidad. Entran en juego otros dos factores. Uno de ellos es que los ácidos nucleicos y las proteínas tienen el potencial suficiente para expresar un gran número de rasgos. Existe una cantidad inmensa de posibles secuencias de ADN, que poseen la clave de una cantidad casi igual de proteínas. Además, incluso en un mismo organismo existen ciertas posibilidades de diversidad, aunque tenga una secuencia determinada de ADN, que sólo pueda producir unas cuantas decenas de miles de proteínas. Ello se debe a que las proteínas a menudo actúan en grupo, y la cantidad de posibles combinaciones es proporcional al número de proteínas distintas elevado a la potencia del número de proteínas que actúan juntas. Este fenómeno parece explicar la forma en que los sistemas inmunizadores de los organismos superiores están en condiciones de producir grandes cantidades de anticuerpos diferentes.

El otro factor que ha llevado a la diversidad es el grado de variabilidad de los entornos en que han estado los seres vivientes desde que comenzó la prolongada historia de este planeta.

El hecho de que hay muchos entornos diferentes en la Tierra, y que estos entornos han cambiado a lo largo de las eras geológicas, implica que ha habido numerosas combinaciones potenciales de proteínas y ácidos nucleicos que, en algunas circunstancias, han permitido una mayor efectividad reproductiva, y por lo tanto, la aparición de nuevas especies. Sin embargo, como las especies se reproducen a sí mismas, también pueden existir variaciones neutras, y otras que tengan un éxito reproductivo mayor o menor. No es cierto en absoluto que todas las formas diferentes de vida que han existido sean el resultado de una previa adaptación a unos ambientes específicos. Tales adaptaciones sólo son uno de los factores importantes que llevan a esa diversidad.

Los biólogos se encuentran en la etapa inicial de la investigación acerca de los mecanismos de la evolución, es decir, cuáles son las estructuras celulares que posibilitaron los grandes cambios biológicos que tuvieron lugar a lo largo de la historia de la Tierra. Los biólogos saben *cuándo* ocurrieron los cambios más significativos. Se ha mostrado, por ejemplo, que después de desarrollarse los primeros organismos eucarióticos hace 1.200 millones de años se produjo un gran incremento en la variedad de seres vivientes. Es probable que posteriormente tuviese lugar un aumento semejante, hace unos mil millones de años, cuando comenzaron a existir los seres multicelulares. Sin embargo, los mecanismos que explican estos períodos tan notables de cambio y plenitud desde el punto de vista biológico sólo se han comprendido en parte.

Un reciente descubrimiento efectuado en las células eucarióticas implica una posible hipótesis. El ADN de dichas células contiene intrones, largos segmentos que no parecen intervenir en la producción de proteínas o el control de los procesos celulares. El biólogo norteamericano Walter Gilbert ha sugerido que estos intrones facilitan la aparición de recombinaciones de segmentos de ADN para producir nuevas combinaciones que se ajusten a las proteínas o que controlen dicho ajuste. La capacidad de hacer esto con más rapidez concedería a los organismos una ventaja evolutiva durante los períodos de rápido cambio ambiental.

Sin embargo, no se ha establecido de manera definida que los intrones desempeñen esta función, o cualquier otra. El ADN no tiene por qué ser útil en su integridad a los organismos existentes. Es el depósito de acontecimientos evolutivos al azar que han tenido lugar en el transcurso de la historia de la vida. Aunque los organismos posean métodos para configurar el ADN de forma que se eliminen ciertos rasgos no esenciales, estos mecanismos de configuración no son perfectos. La evolución biológica no es como un proceso arquitectónico; no equivale a construir una estructura planificada con antelación, en la que todos los elementos que la integran desempeñan un papel esencial. Se parece más a un proceso de remiendo mediante el cual se añaden nuevos elementos, sin que necesariamente se eliminen los elementos antiguos que se han vuelto inútiles.

Existe otra teoría que ayuda a explicar la diversidad de células eucarióticas. Se ha demostrado que estas células son el resultado de una asociación simbiótica entre diversas partes subcelulares que —en una etapa evolutiva anterior— eran organismos dotados de vida autónoma. Quizá la vinculación original haya sido accidental, pero concedió a los organismos una ventaja evolutiva. Dentro de esas nuevas células se produjo una especie de división del trabajo. Los organismos originariamente independientes eran capaces ahora de especializarse en determinadas funciones, de manera que la célula prosperaba en situaciones ambientales donde no podrían vivir los organismos individuales. Como se realizaban con mayor eficiencia las imprescindibles actividades metabólicas que todas las células tienen que llevar a cabo, había más energía y más tiempo disponible para llevar a cabo otras actividades. Por último, las partes vinculadas aprendieron a sincronizar su reproducción de modo que la célula se reprodujese como un todo en sí mismo. Algunos datos empíricos referentes a los actuales organismos respaldan este enfoque, que incluye la existencia de ADN de reproducción independiente en las mitocondrias, estructuras celulares externas al núcleo que desempeñan una función importante en el metabolismo de la energía celular. Todavía es preciso encontrar una demostración definitiva para esta teoría acerca del origen de los eucariotas.

Sea cual fuere el origen de las células eucarióticas, conocemos unas cuantas cosas sobre la forma en que logran su actual diversidad. Los organismos eucarióticos acostumbran tener en su ADN más información que los organismos sin núcleo celular, como, por ejemplo, las bacterias, pero no necesariamente la utilizan de inmediato en su totalidad. En consecuencia, tiene que

haber mecanismos de control que permitan que se use parte de la información, mientras el resto se mantiene almacenado. Aunque esto ocurre también en las bacterias, los mecanismos de control de los eucariotas parecen ser mucho más sofisticados. La segregación misma del ADN en un núcleo introduce una separación adicional entre la información genética y el aparato celular que la traduce en proteínas. Esta separación permite que exista una forma de control en los eucariotas. Los mensajes procedentes del ADN se «transcriben» primero en los correspondientes mensajes de ARN dentro del núcleo. No obstante, sólo una parte de este ARN llega a salir del núcleo para entregar su mensaje a los ribosomas, donde se forman las proteínas. Esta selectividad hace posible una mayor precisión con respecto a cuáles son las proteínas que entran en interacción con otras, en comparación con lo que ocurre cuando se traduce todo el ARN, como sucede con las bacterias.

La capacidad de las células eucarióticas para controlar la manifestación de su amplio almacén de información permite que las distintas células de los organismos multicelulares se especialicen en funciones diferentes. Esta especialización a nivel celular es la que da lugar a la inmensa variedad de actividades de los organismos multicelulares, desde el canto del ruiseñor hasta el apareamiento de los elefantes, pasando por el pensamiento de los seres humanos. Un organismo multicelular no es un conjunto de miles de billones de células, cada una de las cuales hace lo mismo. Por el contrario, dicho organismo contiene centenares de tipos de células, cada uno de los cuales con funciones diferentes. Estas diferencias funcionales son resultado de diferencias químicas y físicas existentes entre las células. Como hay pruebas elocuentes de que el contenido o material genético de todas las células de un organismo es el mismo, las diferencias funcionales y la persistencia de tales diferencias cuando se reproduzcan las células tiene que depender básicamente de la forma en que se controla la manifestación externa de esta información.

Muchas de las cosas que nos gustaría saber acerca de los seres vivientes están relacionadas con los mecanismos de control de las células eucarióticas. Entre tales cosas se incluye uno de los problemas aún sin resolver más importantes de la biología: el desarrollo de los organismos desde las formas inmaduras hasta el estadio adulto.

LOS SERES VIVIENTES FORMAN PARTE DE UNA BIOSFERA

La interdependencia es un rasgo importante de los seres vivientes. La mayoría de los seres vivos depende de otros seres vivos para sobrevivir. Esta dependencia puede ser tan obvia como el hecho de que los animales, para vivir, tienen que comer plantas u otros animales. También asume formas menos explícitas, por ejemplo, las actividades compensadoras de dos tipos de bacterias: uno de ellos «fija» el nitrógeno atmosférico en los compuestos orgánicos, mientras que el otro libera nitrógeno de estos mismos compuestos orgánicos, para volver a llenar el depósito que hay en la atmósfera. Todos los organismos superiores dependen de otros en esta forma. Incluso algunos tipos de bacterias que no parecen requerir de manera directa otros organismos para llevar a cabo sus actividades también dependen indirectamente de los demás. El entorno en el cual se multiplican estas bacterias es en gran medida un producto de las actividades de los seres vivientes. Si se destruyesen todos los demás seres vivos de la Tierra, este entorno cambiaría con rapidez, y es muy probable que también quedasen aniquiladas estas bacterias.

Los ciclos biológicos son una forma de expresar la interdependencia de los seres vivientes. Cada átomo de los elementos biológicamente importantes pasa a través de una serie de encarnaciones. Un átomo de oxígeno exhalado hoy por una ardilla —como parte de una molécula de dióxido de carbono— quizá sea inhalado el año próximo por un arce, y convertido a través de la fotosíntesis en parte de una molécula de azúcar, que Juan Pérez acabará por consumir dentro de cien años (fig. 4).

Para comprender esta idea, tenemos que darnos cuenta de que los átomos que intervienen en los ciclos biológicos pueden pasar sólo un período muy corto de tiempo encarnados en los cuerpos de los seres vivientes individuales. La molécula de dióxido de carbono que exhala la ardilla puede pasar años en la atmósfera antes de que sea inhalada por un árbol. Un átomo de fósforo que en cierta ocasión haya formado parte del cuerpo de un rinoceronte quizá repose en el suelo de África durante siglos antes de que sea tomado por una bacteria e incluido en su cadena de ADN. Los átomos pueden intercambiarse entre los seres vivientes y las demás partes de la Tierra una y otra vez. Aun

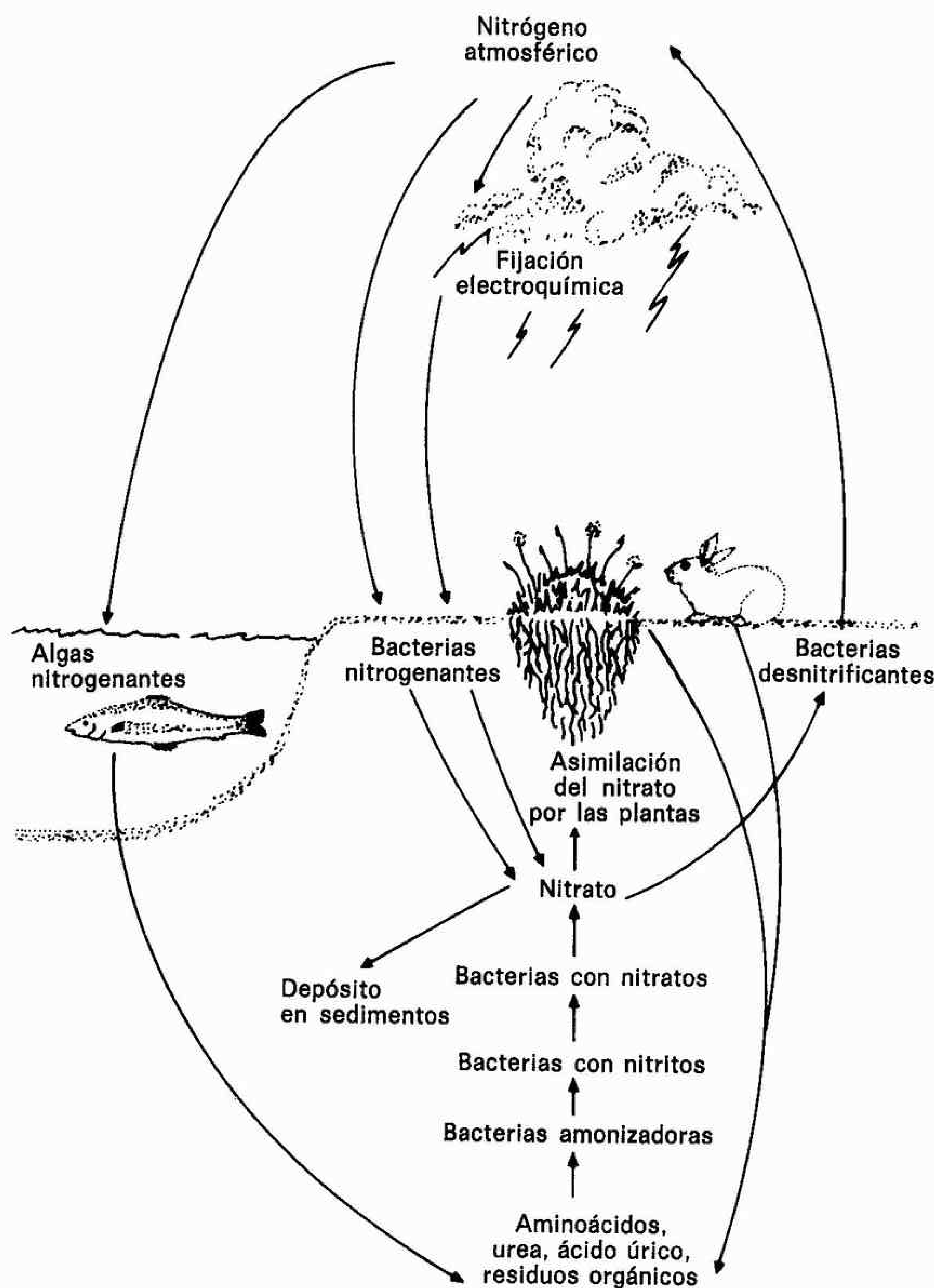


Fig. 4. El ciclo del nitrógeno en la biosfera. La figura muestra algunas de las formas en que el nitrógeno fluye desde la atmósfera a través del suelo y de los seres vivientes, y vuelve más tarde a la atmósfera.

cuando un átomo no está en el cuerpo de un ser viviente, puede tomar parte en procesos físicos —la lluvia, por ejemplo— que desempeñan un papel importante en los ciclos biológicos.

Durante el siglo XIX los biólogos introdujeron la noción de biosfera, consistente en toda la materia que hay en la Tierra y que participa en los ciclos biológicos, pasando a través de los cuerpos de los seres vivos individuales en el transcurso de dichos ciclos.

Definida así, la biosfera es un sistema muy amplio, que consiste en gran parte de la superficie terrestre, incluyendo el agua, el aire y el suelo. El volumen de materia que incluye es millones de veces superior al contenido en un momento determinado dentro de los cuerpos de los seres vivientes individuales. A pesar de su tamaño, la biosfera posee una unidad que es en muchos aspectos tan grande como la de cualquier organismo vivo individual.

El flujo de materia desde uno a otro lugar de la biosfera es análogo al flujo de nutrientes dentro de los seres vivos. Al igual que un ser vivo individual necesita una fuente externa de energía para conservarse vivo, ocurre lo mismo con la biosfera, cuya fuente de energía es la luz solar. Existe una ley física que implica que un objeto sin una fuente externa de energía tiende a aproximarse a un estado de equilibrio a medida que pasa el tiempo. Esto obliga a reponer de manera constante la energía de la biosfera y la de los seres vivos individuales, para que eviten la muerte gracias a un equilibrio con su medio ambiente. Por otra parte, la materia de la biosfera se recicla sin necesidad de añadidos externos.

Aunque la noción de biosfera se introdujo para resumir las propiedades de los ciclos biológicos, algunos científicos han llegado a emplear dicho concepto en un contexto más amplio. Por ejemplo, se suele pensar que la evolución —expresada en lo que respecta a los seres vivos individuales, o incluso en relación a las clases de seres vivos— genera diversidad y produce nuevas criaturas a partir de las antiguas. En cambio, si pensamos en la biosfera como un conjunto, entonces la evolución se dedica a aumentar la complejidad de la biosfera, y le permite incluir mayor cantidad aún de material terrestre en sus ciclos de avance.

La evolución de la biosfera ha durado 3.500 millones de años, y ha dado como resultado un sistema muy integrado que implica la mayor parte de la superficie de la Tierra y la mayor

parte de la materia que hay sobre dicha superficie. La diversidad cada vez mayor de los seres vivientes individuales a lo largo de esta evolución puede considerarse como una táctica que utiliza la biosfera para aumentar su complejidad y su alcance. Estas dos formas de interpretar la evolución tienen dos aspectos análogos al desarrollo de un organismo individual. Por un lado, el desarrollo implica la generación de una población distinta de células diferentes, que tienen un solo progenitor. Por el otro, el proceso de desarrollo produce un organismo individual de una complejidad siempre creciente. Desde este punto de vista, la generación de múltiples tipos de células no es un fin en sí mismo, sino un medio. Al establecer la existencia de la biosfera, las personas se han dado cuenta de que son la parte consciente de un conjunto mucho más amplio.

Las células de los organismos multicelulares pudieron especializarse porque había otras células disponibles para ejecutar algunas de las tareas que las células vivas autónomas llevaban a cabo por su cuenta. De igual modo, el hecho de que los seres vivientes cohabiten en una biosfera les permite a muchos de ellos especializar sus actividades, confiando en que otros seres vivos desempeñen funciones que en caso contrario tendrían que realizar por sí mismos. Por ejemplo, hay pocos seres vivientes que puedan emplear directamente el nitrógeno de la atmósfera para producir aminoácidos. En cambio, la mayoría de los seres vivientes dependen de la capacidad de aquellas bacterias que pueden lograrlo. La mayor parte de los seres vivos obtienen el nitrógeno de forma indirecta gracias a dichas bacterias, o a las plantas que viven en simbiosis con ellas.

En el caso de los organismos multicelulares, las células individuales —con sus funciones especializadas— se desarrollan desde una única célula hacia el resultado final definitivo: producir un organismo adulto que funcione. No hay razón para pensar que la biosfera se dirige de la misma forma. Si fuera posible repetir el curso evolutivo de la vida sobre la Tierra, no sabemos si evolucionarían de nuevo seres vivos del todo similares a los que existen en la actualidad. Parece muy improbable, porque el curso de la evolución ha dependido de factores ambientales aleatorios. Tal intento de repetir la historia quizá produciría un tipo determinado de biosfera, pero no unas mismas manifestaciones individuales específicas. A este respecto, la evolución de la biosfera es semejante a la vida adulta de un individuo, cuya

forma final depende mucho más de factores accidentales que el desarrollo de un embrión a partir de un huevo fecundado.

* * *

Los biólogos han aprendido muchas cosas acerca de la vida, a todos los niveles de su organización. A pesar de ello, les ha sido difícil aplicar las nociones generales que han surgido gracias a sus estudios, para configurar una comprensión pormenorizada de muchas de las actividades de los seres vivientes. Esto es verdad sobre todo en las actividades conjuntas de los organismos multicelulares, por ejemplo, el control de la conducta mediante el sistema nervioso. La razón principal de esta dificultad es el grado de complejidad de la actividad biológica. Incluso en el más sencillo de los seres vivientes intervienen gran cantidad de elementos, y sus actividades implican numerosos procesos de interacción que funcionan al mismo tiempo. Debido a tales interacciones, ni siquiera una comprensión total de cada elemento de los seres vivos implicaría necesariamente una plena comprensión de todas las actividades de la vida. Aunque conociéramos la función de cada una de las células del cuerpo humano, no sabríamos todo lo que hace el cuerpo. (Esto se parece al problema de entender una novela escrita en una lengua extranjera, mirando el significado de cada palabra en un diccionario.)

El problema intelectual al que se enfrentan los biólogos es semejante al de los físicos que trabajan para aplicar las leyes generales de la física a los sistemas físicos complejos, por ejemplo, los cuerpos sólidos formados por muchos elementos. Sin embargo, es un problema aún más radical. Tanto en biología como en física, es probable que se requiera una nueva forma de pensar con objeto de hallar una respuesta a las preguntas que plantea la existencia de sistemas complejos.

PARTE II

EN EL UMBRAL DE LA COMPRENSIÓN

EL PLANTEAMIENTO DE NUEVOS INTERROGANTES

3. EL CUANTO Y EL COSMOS: LOS FÍSICOS BUSCAN RESPUESTAS

La ciencia efectúa a menudo descubrimientos cuando halla contestaciones a preguntas que ya han sido planteadas. A finales del siglo XIX muchos científicos aceptaron que la materia corriente estaba compuesta de átomos, pero no disponían de una imagen convincente para describir el aspecto que tenían los átomos. Los descubrimientos de Ernest Rutherford, J. J. Thomson y otros científicos —a finales del siglo XIX y principios del XX— proporcionaron tal imagen. Se demostró que los átomos contenían cargas eléctricas, y que dichas cargas estaban ordenadas de forma parecida a los planetas y el sol de un sistema solar.

La ciencia continuará avanzando mediante el hallazgo de respuestas a los viejos problemas. Sin embargo, no todas las preguntas sin respuesta de la ciencia actual van a ser contestadas. Algunas de ellas quedarán descartadas, porque los científicos reconocerán que carecen de sentido, al haber surgido de una teoría incorrecta. Esto es lo que ocurrió con una pregunta importante para la física del siglo XIX, que hacía referencia a la estructura del éter, al cual se suponía transmisor de las ondas luminosas. La pregunta en sí misma quedó obsoleta después que Einstein formuló su teoría especial de la relatividad.

En determinadas áreas científicas las nuevas respuestas nos pueden aproximar a agotar los descubrimientos básicos de un ámbito específico. Esto ha ocurrido ya en el terreno de la acústica, que estudia el sonido. Aunque se continúan llevando a cabo descubrimientos, éstos no cambian de manera significativa la imagen global del conocimiento que tenemos acerca de ese sector. Otros terrenos, la cosmología, por ejemplo, están más

abiertos; es improbable que en un futuro previsible nos aproximemos a la última palabra en este campo.

Menos probable aún resulta que lleguemos a las respuestas finales de todos los interrogantes de la ciencia al mismo tiempo. Aunque los científicos estuviesen en condiciones de contestar todas las preguntas que describiremos aquí, las respuestas mismas plantearán nuevas preguntas a los científicos del futuro. El único camino para evitar este estado de cosas sería encontrar un conjunto de principios cuya verdad pareciese tan indiscutible que impidiese todo esfuerzo ulterior para justificar los principios mismos. Desde la época de los antiguos griegos la ciencia ni siquiera ha intentado avanzar en esta dirección, y no creo que lo haga ahora ni tampoco en el futuro.

Además, aunque en un campo científico se logren contestar todas las preguntas que le sean propias, seguirá existiendo el problema de su relación con las demás ciencias. Por ejemplo, si los biólogos consiguiesen brindar una explicación biológica de todos los fenómenos característicos de los seres vivos, quedaría en pie la relación entre tales explicaciones y la forma en que los físicos interpretan la materia, esté o no dotada de vida.

No estoy de acuerdo con el biólogo Gunther Stent, quien sostiene que —como el objeto de la ciencia está casi agotado— el progreso científico se halla próximo a su fin. La ciencia continuará enfrentándose con preguntas sin respuesta, más allá de sus actuales fronteras —en cosmología y en física de las partículas elementales— y dentro de tales fronteras —donde las explicaciones existentes están lejos en muchos casos de suministrar una comprensión detallada de los fenómenos—. Las diversas áreas científicas pueden aumentar o disminuir, pero en la medida en que haya problemas sin respuesta que puedan ser abordados por la mente humana y sus extensiones informáticas, es improbable que finalice el esfuerzo científico en su totalidad.

Hay quienes piensan que la ciencia no puede continuar indefinidamente realizando nuevos descubrimientos, puesto que la mente humana es ella misma finita. Se afirma que hay aspectos del Universo que jamás comprenderemos. Sin embargo, es posible aceptar las limitaciones de la mente humana sin necesidad de concluir que el progreso científico acabará en algún momento. Si hay asuntos que nunca entenderemos, ello se debe probablemente a que implican nociones e interrogantes que jamás se nos ocurrirán. De ello no se sigue, sin embargo, que en

algún momento nos quedemos sin nuevas preguntas para responder.

A los físicos no les resulta difícil plantearse preguntas que no pueden contestar ahora. Hay preguntas sobre cuáles son los objetos fundamentales que existen en el mundo, cómo han evolucionado en el pasado la cantidad y las propiedades de dichos objetos, y cómo seguirán cambiando en el futuro. Existen preguntas sobre las leyes generales que rigen el comportamiento de estos objetos fundamentales, y sobre cómo entender los fenómenos en que interviene la «materia corriente» de acuerdo con los objetos y las leyes fundamentales.

Algunas de estas preguntas son de carácter práctico, por ejemplo, la cantidad exacta de partículas subatómicas y de campos cuánticos que existen en el Universo. Este tipo de pregunta se puede contestar presumiblemente a través de los métodos experimentales que han venido utilizando los físicos. Otras preguntas se proponen deducir las consecuencias de las teorías existentes, y por lo tanto requerirán mejores métodos de cálculo, o incluso una nueva matemática para describirlas. Por último, otras preguntas exigirán el hallazgo de nuevas teorías para describir fenómenos que tenemos razones para creer que no están contenidos dentro del ámbito de las teorías existentes.

La física, en cuanto ciencia que versa sobre los fenómenos más fundamentales, tiene que buscar por su cuenta las respuestas a sus interrogantes. En cambio, las ciencias como la química y la biología a veces pueden «tomar prestados» los descubrimientos de las demás ciencias. Es preciso matizar esta afirmación en dos sentidos distintos. Primero, la matemática (que en mi opinión no es una ciencia, porque carece de contenido empírico) actúa como influjo exterior sobre la física, y brinda nuevas ideas. Además, a veces ocurre que la física aplica a sus propios fenómenos —muy diferentes— un tipo de explicación que antes se utilizó en otra ciencia. Por ejemplo, ya hemos visto que los físicos han utilizado el concepto de evolución —en su origen, una noción biológica— para describir los cambios que ocurren en el contenido de partículas subatómicas del Universo. Los físicos pueden continuar obteniendo ideas estimulantes que procedan de otras ciencias, aunque no se trate de teorías específicas que expliquen los fenómenos de la física.

Los futuros físicos también habrán de enfrentarse con interro-

gantes que surgen a causa de supuestos que se suelen dar por sentados. En mi opinión, todas las leyes de la física —incluso aquellas que parecen verdaderas con mayor evidencia— poseen en último término un carácter fáctico y se encuentran basadas en la observación, en lugar de ser «necesariamente verdaderas» (como es el caso de los principios matemáticos). Las leyes físicas cuya verdad conocemos son verdaderas en nuestro mundo; pero pueden imaginarse otros mundos —coherentes desde el punto de vista lógico— en los que sean falsas. Por ejemplo, cabe concebir un mundo en el que la carga eléctrica total no sea constante, sino que cambie a lo largo de las reacciones entre las partículas subatómicas. En tal caso, algunas de nuestras suposiciones actuales podrían resultar por lo menos incompletas, si es que no falsas. Quizás otras suposiciones puedan llegar a entenderse de acuerdo con nociones aún más fundamentales. Las nociones que los físicos de una época determinada hayan tomado como obviamente verdaderas, más tarde han sido consideradas como necesitadas de explicación. Por ejemplo, el principio según el cual todos los cuerpos caen con la misma aceleración bajo la fuerza de la gravedad fue explicado posteriormente gracias a haber comprendido que la gravedad es consecuencia del espacio-tiempo curvo. Algunos supuestos —tales como que el espacio siempre se ajusta a los axiomas de la geometría euclidiana— han mostrado su falsedad.

Todos los supuestos incluidos en la física actual pueden ser explicados, modificados o sustituidos, pero algunos con más probabilidad que otros. Ciertas nociones que subyacen a nuestra descripción del espacio y el tiempo ya han cambiado considerablemente en el siglo XX, debido a la teoría de la relatividad. También se han puesto en tela de juicio otras partes de esta descripción. Y en mi opinión, la descripción del espacio y el tiempo es probablemente la rama de la física que se verá sometida a mayores cambios.

EL ESTADO FINAL DE LA MATERIA: EL DESTINO DE LOS AGUJEROS NEGROS

Una de las preguntas que aún no sabemos contestar se refiere al destino último de la materia que en algún momento se incorpora a uno de esos extraños objetos que se denominan

agujeros negros. (De hecho, esto puede involucrar a gran parte de la materia que hay en el Universo.)

De acuerdo con la teoría general de la relatividad de Einstein, un objeto que posea una masa lo bastante considerable o una densidad lo bastante grande distorsionará el espacio y el tiempo en su proximidad de una manera tan notable que ni la luz ni ninguna otra forma de materia logrará abandonar ese lugar. Todo lo que se acerque demasiado al agujero negro no podría huir, haga los esfuerzos que haga para conseguirlo. La superficie imaginaria que rodea el agujero negro —que actúa como filtro unidireccional, de manera que nada que esté en su interior pueda escapar— recibe el nombre de horizonte del agujero negro. Según la teoría, los agujeros negros pueden tener una masa cualquiera. Esto implica que el radio del horizonte, que es proporcional a la masa, también puede poseer un valor cualquiera (fig. 5).

Se piensa que uno de los tipos de agujero negro que existen es el producido por la muerte de grandes estrellas con masas varias veces superiores a las de nuestro Sol (unos 10^{33} gramos). Cuando tales estrellas agotan todo su combustible nuclear, se convierten en agujeros negros. Otro tipo de agujero negro —que podría tener una masa de miles de millones de veces superior a la de nuestro Sol— es el formado como resultado de la atracción recíproca de muchas estrellas en el centro de una galaxia. En todos los casos el radio del horizonte no sería demasiado largo, si nos atenemos a criterios astronómicos. El radio de los originados por un colapso estelar sólo tendría unos cuantos kilómetros, y los que se encuentran en el centro de una galaxia únicamente tendrían el tamaño de nuestro Sistema Solar, unos pocos miles de millones de kilómetros.

Sea cual fuere el origen de un agujero negro, una vez que se forma hay que interpretarlo como un nuevo tipo de materia, con propiedades específicas que le son exclusivas: por ejemplo, masa, carga eléctrica y espín. Dos agujeros negros cualesquiera, que tuviesen magnitudes de esta clase con un mismo valor, habrían de considerarse como idénticos, aunque tuviesen orígenes diferentes. Es razonable considerar que los agujeros negros son como partículas subatómicas gigantes. Ambos objetos tienen propiedades semejantes, y además, así como las propiedades de una partícula subatómica recién creada no dependen de aquellas partículas cuya colisión le dio origen, tampoco un agujero

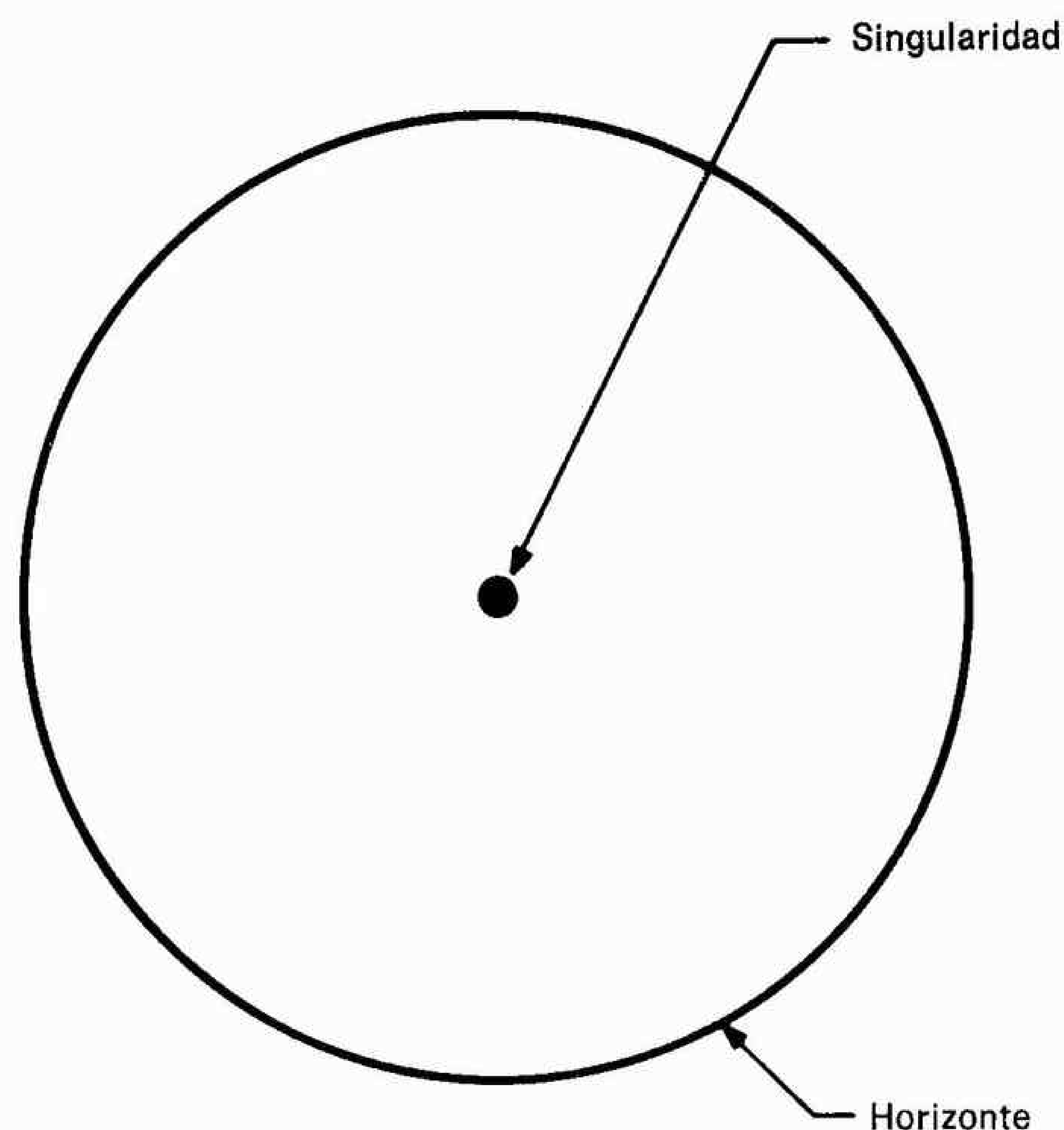


Fig. 5. Un agujero negro simple. El horizonte es una esfera imaginaria a través de la cual sólo se efectúan viajes en una dirección. En la región próxima al centro de la esfera, llamada su singularidad, todavía no sabemos qué es lo que sucede.

negro —visto desde fuera— brinda ninguna indicación acerca de la materia cuya desaparición le hizo surgir. Sin embargo, entre los agujeros negros y las partículas no existe una analogía completa. La gravedad no desempeña un papel significativo en las propiedades de las partículas subatómicas, pero sí lo hace en el caso de los agujeros negros.

Durante algún tiempo los físicos pensaron que cuando se formaba un agujero negro, éste se convertía en el lugar de reposo final para la materia que había caído en él. Además, creían que el estado de la materia que había en su interior estaría siempre a cubierto de la observación exterior.

El físico británico Stephen Hawking ha desencadenado un cambio parcial en este enfoque. Desde el siglo XIX se sabe que los objetos calientes irradian energía a un ritmo que depende de su tamaño, su temperatura y su composición. Para una temperatura y un tamaño dados, el objeto que absorba todas las radiaciones que incidan sobre él se convertirá en el irradiador más efectivo, y por eso se le conoce con el nombre de cuerpo negro. Hawking mostró que un agujero negro irradia energía de hecho, en forma de fotones, como si se tratase de un cuerpo negro con una temperatura específica e inversamente proporcional a su masa. Puesto que la energía se conserva, la energía irradiada por el agujero negro hace que disminuya la energía propia de éste. Puesto que la masa de un objeto en reposo es proporcional a su energía, la masa del agujero negro también disminuirá, y por lo tanto su temperatura aumentará. A su vez, esto hará que irradie más energía, y el proceso se acelerará hasta que casi toda la energía del agujero negro se irradie al exterior en un estallido de irradiación de alta energía. En el caso de un agujero negro que se origine debido al colapso de una estrella, este proceso de evaporación tardará mucho más de 10^{10} años, que es la edad actual del Universo, de manera que no será fácil observar directamente tal proceso.

No existe ninguna teoría que describa lo que sucede cuando, como consecuencia de este proceso, la masa de un agujero negro se ha encogido hasta alcanzar 10^{-5} gramos, aproximadamente lo mismo que la masa de una ameba grande. El radio del agujero, en tales condiciones, sería de sólo unos 10^{-33} centímetros, y mantendría la misma proporción con respecto al tamaño de la ameba, que la que se da entre el tamaño de la ameba y el de todo el Universo observable. La versión actual de la teoría de la relatividad general —que no incluye los efectos de la teoría cuántica— implica que el proceso de irradiación continuará hasta que haya desaparecido toda la masa. A esta altura en el lugar ocupado anteriormente por el agujero negro no quedarán huellas de lo que ha sucedido, y sólo habrá un flujo de radiación que se expande a través del Universo.

Esta imagen del destino de los agujeros negros conlleva que el proceso de formación y decadencia de los mismos provocará una pérdida completa de toda la información acerca de los objetos que formaron originariamente el agujero negro, por ejemplo, qué contenían las partículas subatómicas y cómo se trasla-

daban éstas. Aunque una vez que se ha formado el agujero negro ya no existe ningún modo eficaz de que alguien desde fuera del horizonte averigüe algo sobre dichos objetos —mientras exista el agujero negro—, las condiciones dentro del horizonte pueden depender de las propiedades del agujero en cuestión. Por lo tanto, la información acerca de las partículas originales se almacena, no se destruye.

Si desaparece el agujero negro, también se desvanecerá toda esperanza de recuperar esta información. Sin embargo, para muchos físicos sería sorprendente que la evolución de un agujero negro provocase una pérdida irremisible de información. Dentro de las ecuaciones que describen esta evolución no parece estar incluido ningún mecanismo para la destrucción de información. Estas ecuaciones suponen que, si en algún momento sabemos todo lo posible acerca de un sistema, entonces este sistema evolucionará de manera que continuemos sabiendo tanto como sea posible acerca de él. Sin embargo, debido a las peculiares propiedades del espacio-tiempo en torno de un agujero negro, algunos físicos piensan que ocurre de hecho una pérdida de conocimiento tal como la descrita.

Un enfoque alternativo es que los fotones y el resto de la irradiación que se produce cuando se evapora el agujero negro contienen tanta información como el material que formó originariamente el agujero en cuestión, y que esta información podría recuperarse recogiendo toda la irradiación y efectuando en ella las mediciones adecuadas. Esto es lo que ocurre en un proceso superficialmente semejante: la aniquilación de una cantidad determinada de partículas y antipartículas por irradiación. La opinión según la cual los agujeros negros sólo cambian la forma de la información —pero no la destruyen— es algo sujeto a controversia. Se hace necesario llevar a cabo un análisis teórico más profundo para determinar si las cosas son así.

Otra posibilidad es que el agujero negro —al mismo tiempo— deje de irradiar y de contraerse cuando alcanza un tamaño de unos 10^{-33} centímetros. Si sucediese esto, el resultado final de la evolución de un agujero negro sería un objeto de tamaño ultramicroscópico, que contendría toda la información originariamente almacenada en una estrella o en una galaxia. La magnitud de 10^{-33} es relevante por un motivo. Éste es el tamaño al cual se espera que adquieran importancia los efectos de la teoría cuántica sobre la evolución de un agujero negro. Lamentablemente, aún no estamos en condiciones de saber con precisión cuáles son tales efectos.

Todavía no se ha desarrollado del todo una teoría cuántica de la gravedad. Esta carencia se explica por diversas causas. Una de ellas es que —hasta hace poco— no había demasiados signos de que los efectos de la gravedad cuántica llegasen a aplicarse jamás a algo que pudiésemos observar, de manera que estudiar tales efectos era considerado por la física como algo irrelevante. Otra razón es que la teoría del campo que describe la gravedad presenta dificultades matemáticas que no tienen otras teorías de campo. Por último, se encuentra el peculiar influjo de la gravedad misma sobre las propiedades del espacio y el tiempo. Siempre que tratemos de aplicar la teoría cuántica a la gravedad, hemos de tener en cuenta la forma en que estos efectos cuánticos cambiarán el escenario mismo en que tiene lugar la acción, la región del espacio-tiempo que rodea el punto de interés.

Esta última consideración tiene una importancia especial dentro de las pequeñísimas distancias que antes se han mencionado, porque allí el influjo de la teoría cuántica sobre la distorsión del espacio-tiempo tiene lugar dentro de una región del mismo tamaño que el objeto en cuestión. Algunos físicos han argumentado que en estas condiciones el espacio-tiempo, la masa y otras nociones físicas habituales cambian de manera tan radical que estos conceptos ya no sirven para describir útilmente el mundo. En cambio, quizá hagan falta algunas de las abstracciones más generales que han descubierto los matemáticos. En el momento presente, sencillamente no lo sabemos.

Hay otra cuestión relacionada con los agujeros negros que también parece exigir un gran progreso teórico. Supongamos que un físico —para informarse— efectuase un viaje unidireccional al interior de un agujero negro con el propósito de observar los fenómenos que se dan en su interior (aunque no hubiese forma de comunicar tales datos a quienes deja atrás). Si el agujero negro tuviese una masa de dimensiones galácticas o incluso mayor, este físico dispondría de un considerable lapso de observación antes de sumergirse en el olvido.

De acuerdo con la versión no cuántica de la teoría de la relatividad general, dentro del horizonte de un agujero negro existe por lo menos un punto en el cual los efectos de la gravedad son tan grandes que —en dicho punto y cerca de él— pierde

todo sentido la descripción del espacio y el tiempo. A este punto se le denomina singularidad. También se ha llegado a indicar que pueden existir singularidades gravitacionales que no estén ocultas dentro de horizontes. Si es así, podrían ser estudiadas desde lejos, a través de la radiación que emitan y que absorban. El problema de describir los fenómenos físicos en una singularidad está vinculado con el problema del punto final en la evolución de un agujero negro. La física actual no puede describir lo que sucede en una pequeña región en torno a la singularidad. El tamaño de esta región es aproximadamente el mismo que el de un agujero negro en el punto en el cual dejamos de saber cómo evoluciona.

No se conocen demostraciones convincentes de que en el espacio-tiempo haya puntos —ocultos o no— en los que nunca podremos describir cómo se comportan las propiedades físicas. Por supuesto, sería necesario modificar y ampliar las leyes de la física para que se haga posible tal descripción de las singularidades. Es probable que los mismos principios que nos permitan comprender el estado final en la evolución de un agujero negro también sirvan para describir las condiciones reales de una supuesta singularidad.

Aún no sabemos si la noción necesaria consistirá en una teoría cuántica de la gravedad, o si será proporcionada por algún fenómeno inesperado que tenga lugar en una singularidad o al final de la vida de un agujero negro. Se trata de problemas urgentes para los científicos teóricos, si queremos seguir dando la sensación de que todo lo que existe en el Universo puede estudiarse mediante los métodos de la ciencia. Es menos seguro que dentro de estos interrogantes exista la menor perspectiva de material observable o experimental.

En los agujeros negros cuya masa sea originariamente de tamaño estelar o galáctico, el tiempo que tardan en evolucionar hasta su estado final resulta tan enormemente largo que ninguno de ellos podría haber alcanzado dicho estado desde el principio del Universo. Sin embargo, es posible que agujeros negros mucho más pequeños se hayan formado en los primeros instantes del Universo, cuando las densidades y las presiones eran mucho más elevadas que en la actualidad. Estos «miniagujeros negros» quizá hayan tenido el tiempo suficiente para evolucionar hasta llegar a un estado cercano a la muerte, y es posible que podamos detectarlos a través de la irradiación de alta energía que estarían emitiendo ahora. Se han efectuado intentos de detectar tal irradiación, pero hasta ahora los datos han resultado equívocos. Si llegamos a detectarla, un estudio de dicha radiación quizá nos indique algo acerca del estado final de un agujero negro, y resolvamos así el problema de lo que sucede con la información contenida en la materia.

LOS PROBLEMAS NO RESUELTOS ACERCA DEL ESPACIO Y EL TIEMPO

A lo largo de los últimos cien años, los científicos se han dedicado cada vez más al estudio del espacio y el tiempo. Un resultado de esta búsqueda fue la teoría de la relatividad general, con su descubrimiento de que la materia —a través de su gravedad— puede influir sobre el comportamiento del espacio y el tiempo. Sin embargo, hay preguntas acerca del espacio y el tiempo que no se responden con facilidad dentro de esta teoría, y suposiciones que efectúa la mencionada teoría sin que existan los datos empíricos correspondientes. Estas preguntas —que sin duda ocuparán a los científicos futuros— ya han comenzado a discutirse en nuestro tiempo.

1. ¿Son granulares el espacio y el tiempo?

Un elemento esencial de la descripción del espacio-tiempo que se incluye en las teorías existentes consiste en que los acontecimientos subatómicos posiblemente se hallen cercanos entre sí, de una forma arbitraria, en el espacio o en el tiempo. Otra forma de decir lo mismo sería afirmar que el espacio y el tiempo son continuos (como los números decimales que carecen de final) y no discretos (separados por soluciones de continuidad, como los números enteros o como los átomos que forman la materia). No tenemos datos empíricos sobre el hecho de que los acontecimientos ocurran con una separación arbitrariamente pequeña. De lo que sí poseemos datos experimentales es de que, en separaciones espaciales de sólo 10^{-16} centímetros, las partículas subatómicas se comportan como si el espacio y el tiempo fuesen continuos, sin vacíos intermedios. Además, algunas teorías sobre las partículas subatómicas han implicado cálculos que

permiten separaciones espaciales mucho menores que 10^{-16} centímetros. Podemos considerar que el acuerdo entre estos cálculos y la observación experimental constituye una demostración indirecta de que, si en el espacio o el tiempo hay lagunas, el tamaño de tales lagunas será inferior a las separaciones que permiten dichos cálculos.

A pesar de todo, algunos físicos teóricos han diseñado teorías sobre las partículas subatómicas en las que al espacio y al tiempo se les atribuye una estructura «granular». Muy recientemente, el físico norteamericano de origen chino Tsung-dao Lee y sus colaboradores han llevado a cabo una labor de esta clase.

En dichas teorías se considera que el espacio y el tiempo son una rejilla de puntos discretos, y que el movimiento se produce entre estos puntos, y no de manera continuada. Se considera que la separación de la rejilla es lo bastante pequeña como para que la teoría reproduzca los resultados experimentales conocidos a través de la teoría continua. Al principio, la rejilla se introdujo por razones de simplificación del cálculo. Los cálculos se efectuaban en la rama de la teoría del campo cuántico conocida como cromodinámica cuántica (CDC). En cierto sentido, las ecuaciones de esta teoría pueden enfocarse empleando métodos numéricos con más facilidad que utilizando los métodos analíticos más habituales, por ejemplo, el cálculo.

Estos cálculos numéricos son realizados por computadores, que están más capacitados para tratar acerca del movimiento en un espacio discreto, que acerca del movimiento en un espacio continuo. Cuando los puntos del espacio son continuos, es necesario describir el movimiento en una cantidad infinita de puntos, mientras que en un espacio discreto sólo se necesita una cantidad finita. En cualquier caso, las ecuaciones resultaban demasiado complicadas como para ser resueltas sin un computador, de manera que la capacidad de los computadores desempeñó un papel central para decidir el enfoque más adecuado. Se esperaba que los cálculos informáticos en un espacio discreto —sobre todo en uno cuyos puntos estuviesen muy próximos entre sí— brindasen una aproximación correcta a lo que sucedería en un espacio continuo.

Muchos de estos cálculos informáticos ya han sido realizados, y según parece los resultados son semejantes a lo que los físicos habían supuesto que se daría en el espacio continuo.

Este enfoque de la CDC —que los físicos suelen llamar teoría del campo en rejilla, porque el espacio continuo es sustituido por una rejilla discreta— fue iniciado por el físico norteamericano Kenneth Wilson.

En el contexto de la teoría del campo cuántico hay otra razón para considerar el espacio como granular. A menudo las ecuaciones que se emplean para describir las partículas subatómicas dentro de las teorías del campo cuántico llegan a resultados absurdos desde el punto de vista matemático, que hay que interpretar correctamente para que adquieran sentido. Una parte importante del proceso de interpretación consiste en sustituir las ecuaciones originales por un conjunto modificado de ecuaciones, que da resultados con sentido desde el punto de vista matemático, pero que también depende de un número adicional. En la teoría modificada este número adicional puede asumir valores muy diferentes, y la predicción que la teoría efectúa con respecto a las diversas cantidades físicas depende del valor que tenga el número adicional. Al final del cálculo, a este número adicional se le otorga el valor específico que hubiese tenido en la teoría no modificada. Esto sirve para establecer la predicción con respecto a otras magnitudes físicas, y se la considera como predicción real que la teoría formula para tales magnitudes. A este procedimiento un tanto bizantino se le da el nombre de regularización. Una forma de interpretar este procedimiento de regularización consiste en que el número adicional sea la distancia mínima que separa dos objetos. Una vez más, aquí resulta útil la noción de espacio «discreto». Al acabar el cálculo, la distancia mínima puede fijarse en cero, y las ecuaciones se convierten en idénticas a las de la teoría original.

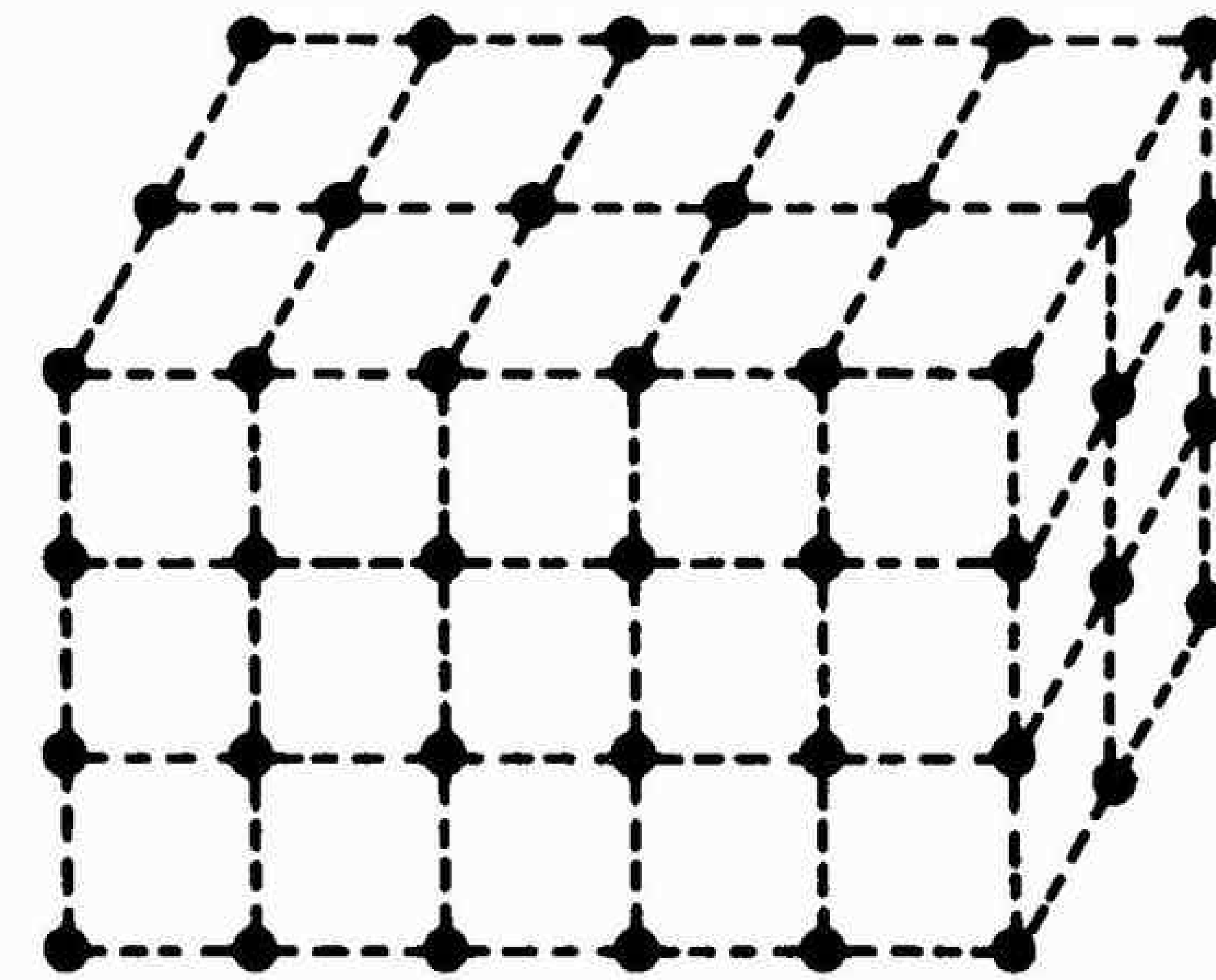
Lo que en un principio era un concepto que sólo se empleaba por razones prácticas más adelante adquirió vida autónoma. Algunos físicos han comenzado a preguntarse si no deberíamos tomar en sentido literal la noción de espacio discreto, como una teoría válida en sí misma, y no como mero esquema aproximativo o método de regularización para una teoría del espacio continuo. Esto constituye un ejemplo excelente sobre cómo influyen en nuestras teorías fundamentales los medios de cálculo que tengamos a nuestra disposición. Y cuando un concepto nuevo lleva a resultados interesantes, hay que tomárselo en serio, sea cual fuere la razón por la que al principio se empezó a utilizar. La historia de la ciencia está repleta de ejemplos de

ideas cuya significación última es independiente de las razones por las cuales se apeló a ellas.

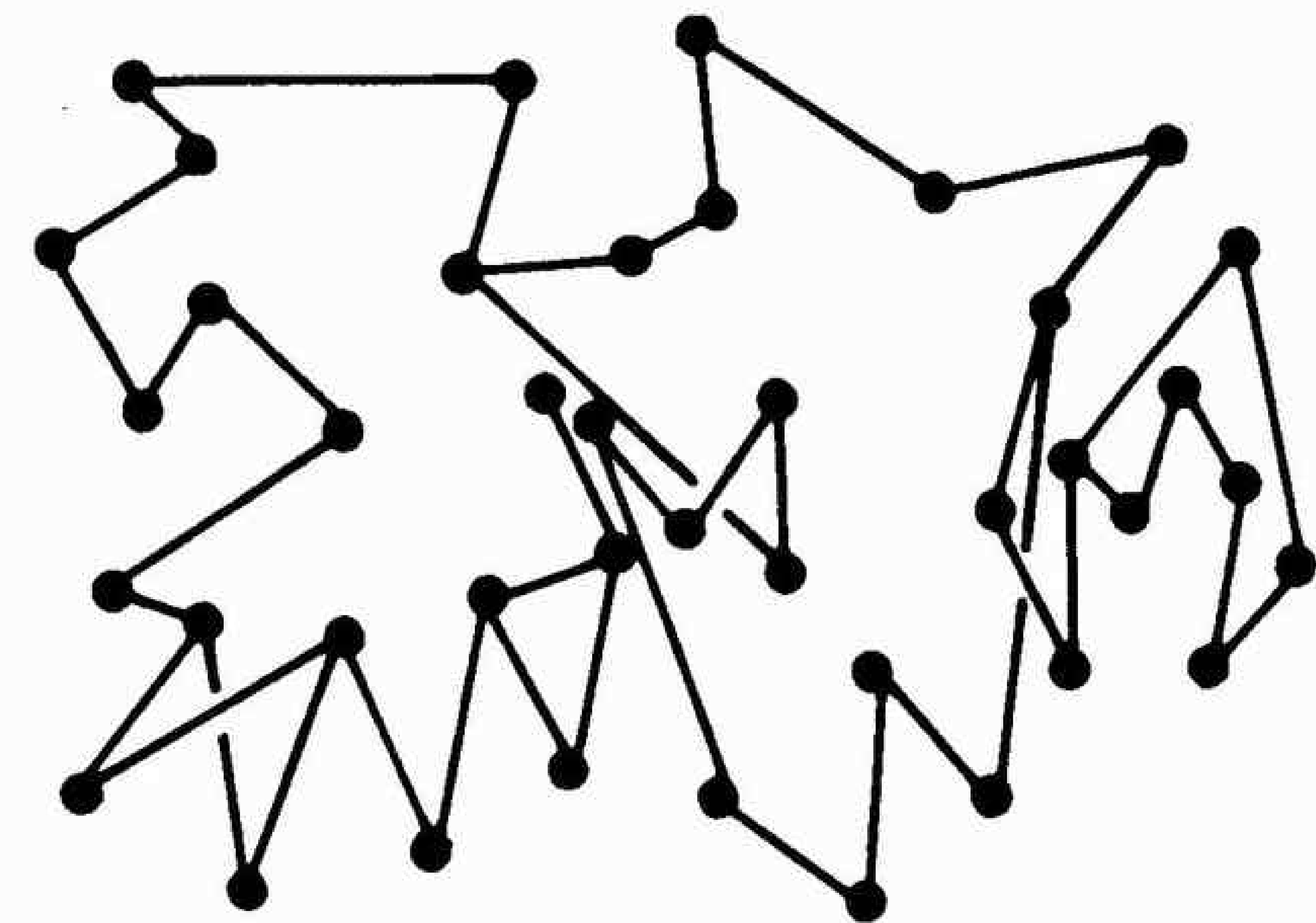
Se han propuesto varios modelos posibles para el espacio-tiempo discreto, pero es demasiado pronto para indicar cuál de ellos es el más plausible. Un enfoque consiste en suponer que en el espacio-tiempo hay una estructura fija subyacente, algo parecido a una rejilla real de puntos. De acuerdo con tal descripción, no tendría sentido preguntarse qué hay «entre» los puntos en el espacio, porque todo movimiento o medición se limitaría a los puntos que existen realmente. No obstante, se plantearían otras preguntas pertinentes. Una de ellas se refiere a la posibilidad de que existan «conexiones» entre los puntos separados, que influyan en la manera de producirse el movimiento. Es decir: ¿puede acaso un objeto que ocupe uno de los puntos de una rejilla desplazarse hacia determinados puntos de la rejilla con más facilidad que hacia otros? Esta pregunta está relacionada con lo que los matemáticos denominan la topología del espacio y el tiempo. En este modelo aparecen otras dos preguntas importantes: ¿cómo surge la ilusión del espacio y el tiempo continuos a través de la rejilla subyacente?, y ¿qué utilidad tiene la teoría de la relatividad (que está sólidamente vinculada con la noción de espacio y tiempo continuos) como descripción aproximativa?

Una alternativa a esta noción de la rejilla fija sería la de una rejilla más «plástica». De acuerdo con este modelo, aunque cualquier ejemplo específico de movimiento se dé entre una cantidad finita de puntos discretos, los puntos no son los mismos en los diferentes casos de movimiento. Todo movimiento específico tendrá lugar entre puntos de una rejilla irregular (fig. 6). Cuando se toman en consideración todos los movimientos posibles, puede ocuparse cada punto del espacio-tiempo continuo. Es probable que este enfoque pueda conectarse con la máxima facilidad con la habitual descripción continua. Tampoco exigiría una explicación con respecto a la estructura fija de la rejilla subyacente. Lo que aún no se ha comprendido del todo son cuáles serían los nuevos fenómenos observables implicados por la teoría de la rejilla plástica.

¿Es realmente necesario un cambio tan radical en nuestra noción del espacio y el tiempo, pasando de lo continuo a lo discreto? Creo que sí, sobre todo cuando analizamos las distancias tan cortas en las cuales la teoría cuántica y la gravedad adquie-



A Rejilla regular



B Rejilla irregular

Fig. 6. Dos tipos de rejillas tridimensionales. En la rejilla regular *A*, los puntos están ordenados y conectados de una forma sencilla. En la rejilla irregular *B*, el orden y las conexiones existentes entre los puntos no se ajustan a un patrón sencillo.

ren importancia al mismo tiempo. Si éste es el criterio principal para determinar el carácter discreto del espacio, entonces, la distancia a la cual aparezca este carácter discreto serán los 10^{-33} centímetros antes mencionados. Quizá cuando seamos capaces de observar los instantes finales de la vida de un agujero negro, obtengamos cierta visión acerca de la atomicidad definitiva, la del espacio-tiempo en sí mismo. Mi actual labor de investigación versa sobre esta cuestión. Mientras tanto, algunos físicos continúan activamente el análisis de teorías en las cuales el espacio-tiempo posee una estructura granular. Tal análisis puede darnos indicios sobre los nuevos fenómenos que lleguen a estudiar los físicos experimentales.

2. ¿Cuántas dimensiones existen?

Se suele dar por sentado que existen tres dimensiones en el espacio, y una única dimensión en el tiempo. Es decir, que a cualquier acontecimiento que tenga lugar en el Universo hay que atribuirle una localización en el espacio utilizando tres coordenadas, y una localización en el tiempo utilizando sólo una. Sin embargo, los físicos y los matemáticos han estudiado mundos hipotéticos en los que existen una cantidad mayor o menor de dimensiones, y por lo tanto se plantean interrogantes sobre si la creencia habitual acerca de nuestro mundo es correcta en sentido estricto, y en el caso de que lo sea, sobre si existe alguna razón para ello. Por ejemplo, cabe considerar la posibilidad de que existan en realidad cuatro dimensiones en el espacio, pero que —por alguna razón— todos los fenómenos que solemos observar poseen la misma magnitud en lo que respecta a una de las coordenadas espaciales. En otras palabras, podríamos ser como las criaturas que vivían en la Tierra Plana, confinadas de manera permanente en la superficie de una mesa, en su movimiento y en su percepción, e ignorantes por lo tanto de la otra dimensión de la realidad.

Desde hace un siglo se sabe que, si en el espacio hubiese más de tres dimensiones, y si fuese posible un movimiento libre en todas las dimensiones de la misma forma, entonces no se darían algunas de las leyes conocidas de la física. Una de éstas es la ley de la razón inversa del cuadrado de las distancias en lo que respecta a la fuerza de la gravedad. Este argumento brinda

una nueva demostración de que el espacio es en realidad tridimensional, pero no explica por qué lo es. Además, no excluye la posibilidad de que nuestro mundo tenga una cantidad superior de dimensiones, pero que la mayoría de los fenómenos se vean limitados en lo que respecta a sus posibles variaciones dentro de la dimensión adicional.

Un enfoque de este interrogante consistiría en considerar cómo se comportarían los espacios y los tiempos con distintas cantidades de dimensiones. Por ejemplo, quizá se descubra que también las dimensiones del espacio y el tiempo están ellas mismas sometidas a evolución, y que los valores que nos son familiares constituyen el resultado de dicha evolución en la actualidad. Este enfoque implicaría una relación entre la cantidad de dimensiones y otras magnitudes físicas, como, por ejemplo, la temperatura del Universo. Mediante tales relaciones, las dimensiones quedarían determinadas por esas otras magnitudes. Como se suele considerar que la cantidad de dimensiones es un número entero, sería imposible que una dimensión desapareciese a lo largo de la evolución. En cambio, lo que podría suceder en el transcurso de una evolución sería que ciertas dimensiones adicionales llegasen a suprimirse en comparación con otras, como ha ocurrido con las pezuñas de algunos animales durante la evolución biológica. Nuestra imagen actual de la expansión del Universo convierte esta idea en algo mucho más plausible de lo que era anteriormente. Como todas las cosas se hallaban mucho más cercanas entre sí de lo que están ahora, podemos imaginar que en realidad hay más dimensiones de las que pensamos. La expansión del Universo puede haber tenido lugar de manera asimétrica, de manera que en una de las dimensiones no haya habido expansión, o haya sido muy reducida, y la escala de distancia en dicha dimensión continúe siendo tan pequeña como lo era al principio del Universo.

Si esta idea es correcta, significaría que en realidad existen más dimensiones que aquellas a las cuales estamos acostumbrados. Sería muy interesante descubrir un medio tecnológico para encontrar y estudiar las dimensiones que ahora resultan inaccesibles. En un Universo con más de cuatro dimensiones algunos fenómenos serían diferentes, con toda probabilidad, aunque no existiese simetría entre las diferentes dimensiones. Sería de gran interés descubrir tales fenómenos y comprobar si son observables.

Es posible que estas hipotéticas dimensiones adicionales no sólo tengan un ámbito restringido, sino que estén conectadas entre sí de un modo diferente al habitual. Nuestro espacio-tiempo podría ser como el cilindro de la figura 7, abierto en el sentido de su longitud, pero cerrado en la otra dirección. Esto manifestaría interesantes consecuencias con respecto a la forma en que las magnitudes físicas varíen en estas dimensiones adicionales. Por ejemplo, según la teoría cuántica, para cada dimensión espacial que esté cerrada —por ejemplo, un círculo— existe una propiedad asociada —en este caso, el momento cinético— cuyo valor asume magnitudes discretas, múltiplos enteros de una unidad. En cambio, para la coordenada sin limitaciones de un espacio abierto, la propiedad correspondiente puede variar de manera continuada.

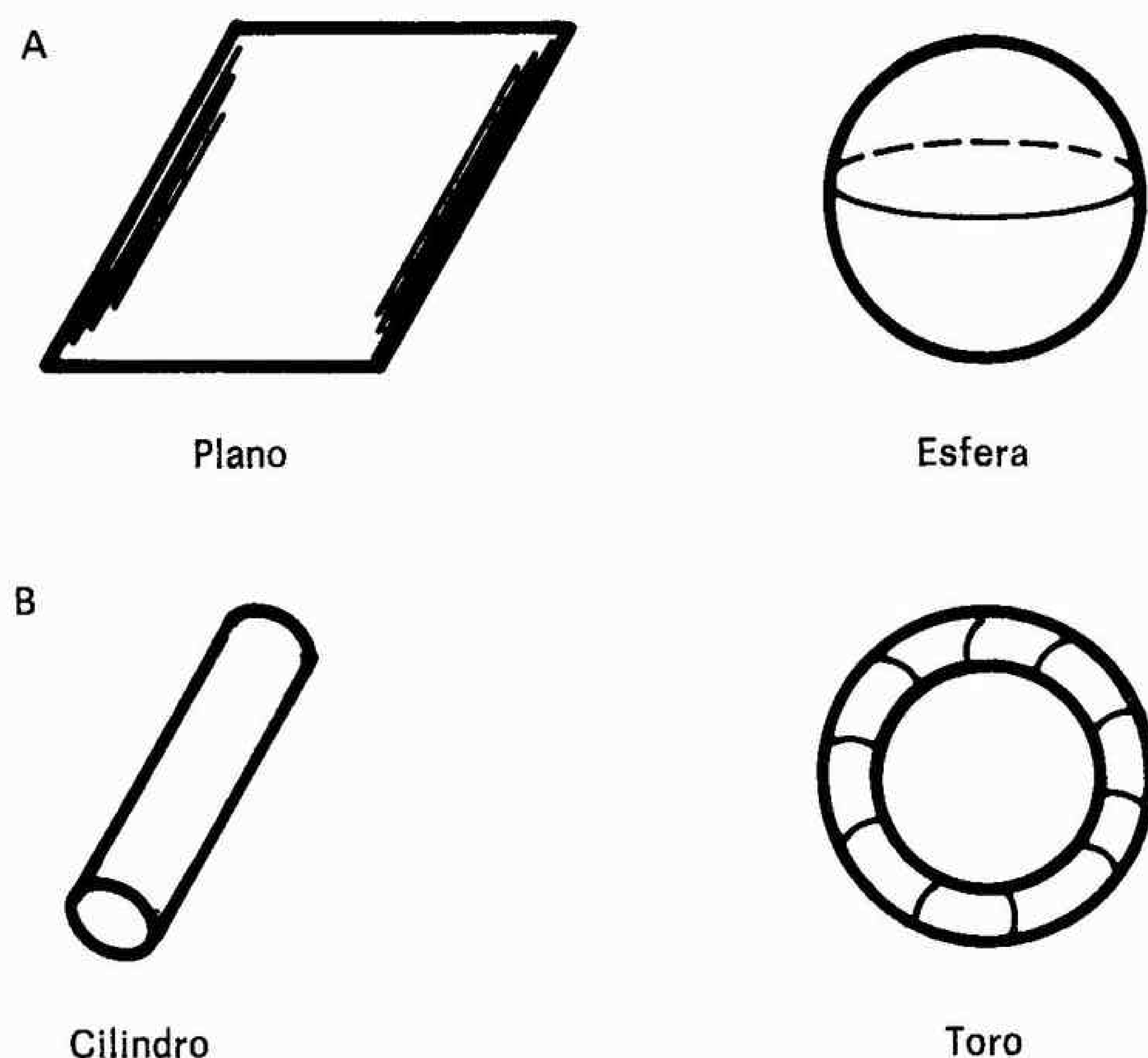


Fig. 7. Dos tipos de espacios multidimensionales. Cada espacio consiste en la superficie de la figura que se representa. En *A*, cada espacio posee dos dimensiones semejantes. En *B*, los espacios poseen dos dimensiones no semejantes.

Las investigaciones teóricas han mostrado que, si la teoría general de la relatividad se establece en un espacio-tiempo con más de cuatro dimensiones, y si el ámbito de las demás dimensiones es pequeño y está conectado como si fuese un cilindro, entonces la teoría resultante no se limita a describir la gravedad sino también el electromagnetismo y los demás campos que se han introducido para describir las partículas subatómicas. En este caso, las dimensiones adicionales no están vinculadas con el espacio y el tiempo, sino con las simetrías internas mencionadas en el capítulo 1. Los físicos intentan activamente unificar así las simetrías espaciotemporales y las simetrías internas.

Si existen de hecho otras dimensiones, seguiríamos deseando justificar su cantidad exacta, a través de otros principios de carácter más básico. En el tipo de teoría que acabamos de describir, la cantidad total de dimensiones estará relacionada a través de una simetría interna con la cantidad de campos cuánticos que existan. Sin embargo, seguiremos necesitando comprender por qué han sido precisamente cuatro las dimensiones que se han expandido, mientras que las demás permanecían pequeñas. El interrogante acerca de las dimensiones del espacio-tiempo está maduro para una investigación más rigurosa. Espero que en los próximos años aparezcan nuevas perspectivas en este terreno.

3. La dirección del tiempo

Aunque a veces se considere que la teoría de la relatividad especial trata el espacio y el tiempo en pie de igualdad, existen profundas diferencias entre las propiedades observadas de ambos factores. Somos libres de movernos a través del espacio a distintas velocidades, pero nuestro movimiento a través del tiempo es casi fijo. Ello es consecuencia de las teorías de la relatividad: el tiempo pasa a un ritmo diferente para dos observadores que se muevan uno con respecto al otro, o que estén en lugares diferentes dentro de un campo gravitacional. Tales efectos han sido detectados únicamente gracias a sensibles instrumentos de laboratorio, y no aparecen en la experiencia humana

ordinaria, ya que los movimientos relativos de las personas han sido hasta ahora muy pequeños. (Los efectos podrían ser importantes en un futuro algo lejano, cuando comiencen los vuelos interestelares. Entonces puede haber diversas personas que se muevan a velocidades relativas que constituyan una fracción significativa de la velocidad de la luz, y es en estas condiciones cuando se pondrían de manifiesto los efectos del movimiento relativo a lo largo del tiempo.)

Sin embargo, existe una diferencia más profunda entre el movimiento a través del espacio y el que se produce a través del tiempo, una diferencia que no se ve afectada por la teoría de la relatividad. Si concebimos los instantes del tiempo como formando una línea que se extiende hacia el pasado y hacia el futuro, entonces nos movemos de manera inexorable en una dirección a lo largo de esta línea, desde el pasado hacia el futuro. Los acontecimientos del pasado sólo nos son accesibles mediante la memoria; los del futuro no son accesibles en absoluto.

La direccionalidad del tiempo no sólo está relacionada con la percepción humana. Muchos procesos físicos, sobre todo aquellos en que intervienen objetos con un tamaño superior al atómico, tienen lugar como si tales objetos se llevasen a cabo en el tiempo siguiendo una única dirección. Cuando se mezclan dos líquidos, uno caliente y otro frío, el líquido combinado pronto alcanza una temperatura intermedia entre los dos anteriores. El proceso inverso —un líquido a una temperatura uniforme que se separe en dos corrientes de distinta temperatura— no ocurre en la naturaleza de forma espontánea. Sólo un estímulo externo —por ejemplo, la intervención humana— puede hacer que suceda tal cosa.

Imaginemos, sin embargo, una película del proceso de mezcla que se proyecta hacia atrás ante un público que no esté advertido del fenómeno. En la pantalla se vería justamente el proceso inverso al que se observa en la naturaleza. Si en la película aparecieran otros procesos —por ejemplo, el giro de las manecillas de un reloj—, el público se daría cuenta en seguida de lo que está sucediendo. Un público constituido por físicos no necesitaría esta clase de pistas para llegar a tal conclusión.

Mediante el análisis de muchos procesos de este tipo, los físicos han establecido que los acontecimientos espontáneos tienen la tendencia a producirse de una manera que hace que disminuya el orden existente. La denominación técnica de esta

conclusión es ley del aumento de la entropía, y entropía es el nombre que los físicos dan a una medida del volumen de desorden. En este contexto, se considera que un sistema está más ordenado cuanto más se aparta de una distribución igualitaria entre sus estados posibles. Por ejemplo, un conjunto de átomos que estuviesen todos ellos en el mismo estado sería un sistema más ordenado que la mezcla de los mismos átomos distribuidos entre muchos estados. En otras palabras, el orden se identifica con una desviación con respecto a lo que ocurriría si los átomos fuesen asignados al azar a los diferentes estados. La ley del aumento de la entropía se refiere a los procesos espontáneos, es decir, a aquellos que ocurren en un sistema físico aislado, no afectado por algo externo a él mismo. La noción de tales sistemas aislados sólo puede considerarse como una aproximación, porque jamás se da un sistema que esté completamente aislado. No obstante, en la mayoría de los casos se trata de una aproximación correcta. Si un sistema lleva a cabo una interacción considerable con respecto a su entorno, su orden puede aumentar con facilidad, como ha sido el caso de la vida sobre la Tierra gracias a recibir la luz solar a lo largo de miles de millones de años.

Hay ciertas preguntas básicas que están vinculadas con este principio de la disminución del orden, y los físicos han llegado a considerarlas como problemas relacionados con la direccionalidad del tiempo. Uno de los interrogantes se refiere al contraste entre lo que sucede en los procesos en que intervienen objetos grandes, y en los procesos en que intervienen partículas subatómicas o incluso sistemas algo más complejos, por ejemplo, átomos o pequeñas moléculas. De acuerdo con las leyes fundamentales de la física, en estos últimos casos no se puede determinar cuál es la dirección del tiempo. Si pudiésemos filmar una película de un proceso subatómico o atómico, no tendríamos posibilidad de establecer si la película se proyecta hacia delante o hacia atrás: en cualquiera de los dos casos parecería «correcta». El micromundo es un mundo al azar en el cual el pasado y el futuro resultan imposibles de distinguir. Los físicos dicen que las leyes fundamentales de estos microprocesos «se ajustan a la simetría de la inversión temporal». ¿Por qué, se preguntan los físicos, el tiempo fluye en una sola dirección en el mundo de la vida cotidiana, cuando en el micromundo parece fluir en ambas direcciones?

Ésta constituye una de las más antiguas preguntas de la física que aún no han sido contestadas a satisfacción de todos. Se planteó por primera vez en los últimos años del siglo XIX. A lo largo de los años se han propuesto diversas contestaciones, pero muchos físicos —entre los que me incluyo— tienen la sensación de que aún no se ha dicho la última palabra sobre el tema. La respuesta habitual afirma que sólo es verdad en un sentido aproximativo la noción según la cual el tiempo tiene una sola dirección en el mundo de los objetos a gran escala. Resulta casi del todo probable que las cosas sean así, pero no es algo absolutamente seguro.

Se aduce que, a situaciones igualmente probables a un micronivel, en el nivel de los objetos familiares les corresponde con más frecuencia una situación desordenada, y no una situación ordenada. Por ejemplo, una disposición regular de átomos en una estructura cristalina constituye sólo una entre gran cantidad de posibles disposiciones, la mayoría de las cuales son irregulares (fig. 8). En consecuencia, cuando en un sistema se producen cambios —por ejemplo, ajustes de temperatura al poner en contacto dos objetos de temperatura desigual— es más probable que dichos cambios se den en la dirección de una disminución del orden. Esta disminución del orden es lo que denominamos «aumento de la entropía». Es la piedra angular del concepto que tienen los físicos sobre el tiempo que se desplaza hacia delante en el macromundo.

Según este argumento, es posible calcular desde el punto de vista cuantitativo —en los sistemas aislados de distintos tamaños— la importancia de las posibles desviaciones con respecto a la dirección hacia delante del tiempo. Por ejemplo, podemos calcular la frecuencia con que un sistema cambia espontáneamente en la dirección de aumentar su orden y no de disminuirlo (circunstancia que cabría interpretar como un flujo temporal invertido). Esto ocurrre con facilidad en pequeños sistemas en los que sólo intervienen unos cuantos átomos, pero se hace cada vez menos probable a medida que aumenta la cantidad de átomos en el sistema. Otra forma de entender este fenómeno consiste en preguntarse durante cuánto tiempo habría que observar el sistema para que tuviese lugar un aumento espontáneo del orden como el que estamos examinando. En sistemas pequeños esto no tardaría mucho más que un proceso individual. En un sistema de grandes dimensiones —incluso en uno que contenga

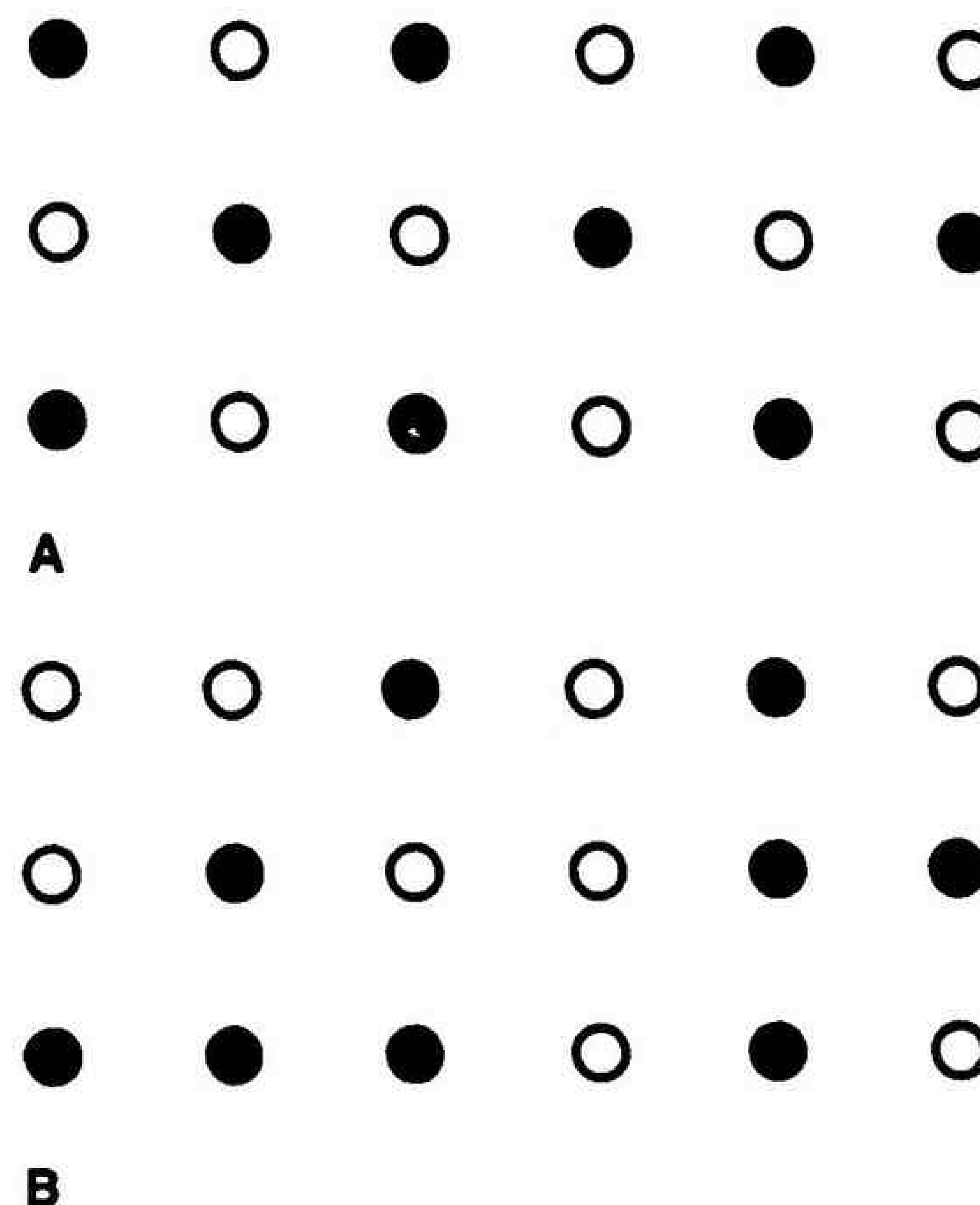


Fig. 8. Disposiciones regulares e irregulares. En *A* aparecen en una estructura regular dos tipos de objetos, representados por círculos blancos y negros. En *B* aparecen los mismos objetos, en una de las múltiples estructuras irregulares que son posibles.

sólo un millar de átomos— el tiempo necesario para que se produzca tal inversión aumenta enormemente. Tardaría mucho más tiempo que la edad actual del Universo.

Esta interpretación de la disminución del orden ha sido aceptada por todos durante alrededor de cien años, desde que fue propuesta por primera vez por el físico austriaco Ludwig Boltzmann y por otros científicos. Sin embargo, existen problemas de carácter teórico que preocupan a muchos físicos. Un interrogante se refiere a si en realidad disminuye el orden. No hay duda de que, a nivel macroscópico, el orden es menor. Cuando

se vierte un litro de agua fría sobre un litro de agua caliente, el agua tibia resultante implica una disminución del orden porque —si los átomos hubiesen sido asignados al azar a uno u otro de los litros originales— resulta muy improbable que todos los átomos «calientes», aquellos que tienen más energía, hayan acabado en sólo uno de los litros. Sin embargo, se ha señalado que a un micronivel la cantidad de orden es siempre la misma. Podemos considerar que estamos observando un proceso en el que hay menos orden, pero lo que sucede en realidad es que el orden se traslada desde una forma visible para nosotros a otras formas, que no resultan tan visibles. En otras palabras, la «disminución» sólo se produce en nuestra información, en lo que sabemos acerca del sistema, y no es un cambio objetivo dentro del propio sistema.

Esta idea resulta atractiva para algunos físicos, quizá debido a que es mejor que nunca se pierda nada, pero hay otros físicos que la rechazan. Consideran que constituye una innecesaria introducción de la subjetividad en las leyes físicas. Uno u otro de estos puntos de vista son defendidos con fuerza por distintos grupos de físicos, y el hecho de que persistan tales desacuerdos constituye una elocuente señal de que la pregunta aún sigue sin una respuesta satisfactoria.

Es posible que un descubrimiento experimental solucione este problema, pero es muy improbable que ocurra tal cosa. Lo más probable es que haya un nuevo análisis del problema, lo bastante convincente como para satisfacer a todos los físicos futuros. Un análisis de este tipo puede abarcar también la forma en que las mediciones realizadas sobre un sistema físico influyen en lo que conocemos acerca del sistema. Esto ha sido un tema de controversia dentro de la mecánica cuántica, y muchos científicos —incluido yo mismo— creemos que su solución está vinculada con la pregunta sobre si el orden tiende a disminuir, y por qué.

Puesto que observamos que los macroprocesos avanzan desde una situación más ordenada hasta otra que está menos ordenada, en primer lugar hemos de preguntarnos cómo surgen las situaciones que poseen un orden elevado. Tal como se afirmó antes, es posible que un sistema en interacción con un entorno se convierta en más ordenado, como consecuencia de una aportación de energía procedente del entorno. Por ejemplo, una piscina de agua en la que hay disuelta sal puede transformarse en vapor de agua y sal cristalizada, debido a la absorción de luz solar. Esto no contradice la ley del aumento de la entropía, porque el mayor orden de la piscina queda compensado por una disminución igual o mayor en el orden del entorno. En el caso que ahora analizamos, ello se debe a que la energía de la luz solar que se absorbe está más ordenada que la energía que más adelante regresa al entorno.

Mediante tales procesos el desorden puede trasladarse con facilidad de un lugar a otro de nuestro Universo, y durante el proceso pueden configurarse concentraciones localizadas de orden. Sin embargo, esto nos lleva a preguntarnos por qué todo el Universo parece estar ahora en un estado relativamente ordenado. Por ejemplo, existen enormes diferencias de temperatura entre el espacio y las estrellas. En una etapa primitiva del Universo, debe haber surgido de algún modo un elevado grado de orden, que va descifrándose gradualmente a medida que pasa el tiempo. La forma en que el Universo llegó a poseer un elevado orden inicial constituye uno de los problemas de la cosmología, y tendrá que solucionarse dentro de ese contexto.

No resulta difícil aceptar que algunas zonas —por ejemplo, el interior de las estrellas, cuya densidad representa un elevado grado de orden— pueden haber aparecido a través de una evolución natural del Universo. La expansión de éste, que introduce en él un desequilibrio permanente, desempeña un papel fundamental dentro de esta manera de pensar. Puesto que el Universo se expande, la materia que se hallaba en un estado de máximo desorden en determinada etapa del Universo se estructuró de acuerdo con un orden en una etapa posterior, debido a las influencias ambientales, como el descenso en la temperatura del espacio circundante. A continuación, tuvieron lugar procesos que antes habrían resultado imposibles. Evolucionó el tipo de materia encontrado en el Universo, y la mayor parte de la materia se consolidó formando resplandecientes estrellas que viajan por un espacio frío y vacío.

El hecho de que el espacio esté vacío en su mayor parte, y pueda servir como depósito al cual se pueden emitir indefinidamente radiaciones, también se halla estrechamente vinculado con la expansión del Universo. Esta circunstancia es muy importante en lo que tiene que ver con el orden aparente. Si el espacio estuviera lleno de radiaciones de alta temperatura, algunos procesos que se observan cuando disminuye el orden inter-

no serían sustituidos por un proceso en el que el orden interno aumenta a través de la absorción de esta radiación. A pesar de todo, incluso en este enfoque «cosmológico» de la disminución del orden sigue habiendo un problema: en sus primeros instantes, el Universo parece haber tenido mucho más orden del necesario. Si al principio del Universo hubieran existido muchos agujeros negros, en vez de muchas partículas subatómicas, la cantidad de orden hubiese sido lo más pequeña posible. Todo lo que ha ocurrido desde el momento del *Big Bang* ha producido únicamente un pequeño descenso hacia el mínimo teórico. Por lo tanto, el problema del descenso que se observa en el orden nos lleva a la cuestión de cómo se originó el Universo.

¿QUÉ SUCEDIÓ ANTES DEL «BIG BANG»?

Los físicos describen el Universo actual como algo que surgió de un estado caracterizado por temperaturas y densidades inmensas, que existió hace unos 15.000 millones de años. Al parecer, la evolución a partir de entonces no dependió demasiado de las condiciones que había en el momento originario. De manera paulatina, los físicos han llegado a darse cuenta de que muchos de los rasgos del Universo actual también habrían surgido a partir de una diversidad de circunstancias iniciales. Por ejemplo, ahora creemos que el exceso de electrones que hay en el Universo —en comparación con los positrones— se habría producido de igual modo, aunque al comienzo del Universo hubiese habido una cantidad relativa diferente de estas dos clases de partículas. Las teorías existentes señalan que —en los primeros momentos del Universo— la cantidad relativa de electrones y de positrones se modificó, de una manera que eliminó toda diferencia de cantidad entre ambos. La diferencia que ahora observamos se produjo poco después, aunque también en los primeros instantes del Universo. Conocemos otras circunstancias en las cuales el resultado final es independiente de las circunstancias iniciales. Un objeto que tenga un peso y una forma particulares, y que caiga a través de la atmósfera, alcanza rápidamente la misma velocidad terminal, sea cual fuere su velocidad inicial.

Desde el punto de vista del físico, esta idea tiene al mismo tiempo aspectos buenos y malos. Significa que podemos confiar

en comprender en gran medida cómo el mundo ha llegado a su forma actual, sin tener que invocar condiciones arbitrarias que se hayan dado al principio del tiempo. Por otra parte, significa que somos incapaces de aprender demasiado acerca de estas condiciones iniciales a partir de lo que podamos observar en la actualidad. Esto dificulta el responder a preguntas acerca de la forma en que se inició la expansión del Universo, y de las condiciones anteriores al comienzo de su existencia.

Sin embargo, podemos emplear los métodos de la física teórica para buscar respuestas a estos interrogantes, aunque siempre surge en el camino un obstáculo de importancia. Se trata de la teoría general de la relatividad, que afirma que la intensa gravedad que había en el Universo primitivo distorsionó tanto el espacio como el tiempo. Debido a estos importantes influjos gravitacionales —y a la posible función desempeñada por los efectos cuánticos sobre la gravedad en estas condiciones (que no comprendemos del todo)— el tiempo puede haberse comportado de una forma diferente a la que asume en las condiciones actuales. Algunos científicos han extraído la conclusión de que no es factible descubrir leyes que hubiesen sido válidas tanto antes como después del comienzo de nuestro Universo. Por consiguiente, sostienen ellos, debemos aceptar que el Universo actual es una entidad en sí misma considerada, con sus propias leyes peculiares, y que carece de sentido imaginarse cómo puede haber surgido el *Big Bang* desde un proceso previo. Sin embargo, en la mayoría de los casos los físicos se oponen visceralmente a aceptar una limitación arbitraria de lo que pueda entenderse. Continuamos especulando, por lo tanto, sobre la forma en que comenzó el Universo.

Como sabemos que el Universo ha evolucionado a todos los niveles desde el momento del *Big Bang*, resulta plausible pensar que también antes de éste hubo una evolución. En otras palabras, no habría que considerar el *Big Bang* como el comienzo absoluto del Universo, sino únicamente como el comienzo de la última fase de la historia universal. ¿Podrán someterse a investigación científica las etapas anteriores? Algunos científicos dicen que no, pero esta opinión me parece tan desacertada como la decimonónica predicción del matemático y filósofo francés Auguste Comte, según el cual nunca sabríamos nada sobre lo que hay dentro de las estrellas. Si se tiene en cuenta esto, podemos revisar algunas de las ideas que ya se han propuesto

acerca de la historia del Universo antes del *Big Bang*, y acerca de la forma en que sucedió éste.

Una de las concepciones sobre el origen del Universo se basa en la noción de que el Universo es finito, y su expansión no continuará para siempre. El Universo se comportará como un cohete cuya velocidad es menor que la necesaria para huir de la atracción de la Tierra. Su expansión se hará cada vez más lenta, hasta que se detenga. A esto seguirá una contracción, al principio muy lenta, pero que irá acelerándose cada vez más, de manera que en un futuro muy lejano se repetirán de manera aproximada las condiciones que había al principio del Universo. Nuestra «fase» del Universo acabará con un *Big Crunch*, un gran crujido.

Según la teoría general de la relatividad, si la densidad total de la materia del Universo es lo suficientemente alta, el Universo es finito, situación que se da en la práctica. Las observaciones efectuadas nos indican que la densidad real es al menos un 10 % del valor mínimo necesario para que se dé un Universo finito, pero quizás un conocimiento más profundo de las posibles formas no luminosas de materia en el Universo nos permita establecer esta cuestión con más precisión. (Por ejemplo, creemos que existen grandes cantidades de neutrinos, partículas que carecen virtualmente de masa y que tienen una carga eléctrica igual a cero. Menos seguros estamos con respecto a la existencia de otras formas de materia «oscura».) Si este escenario describe con fidelidad lo que sucederá en el futuro, entonces lo mismo puede haber ocurrido en el pasado, y nuestro *Big Bang* podría ser la etapa siguiente a un período de contracción anterior. En este modelo, cabe imaginar que el Universo ha existido siempre, y que ha pasado por infinitos ciclos de expansión y de contracción, como un muelle que se comprime y se extiende una y otra vez, interminablemente (fig. 9).

Uno de los problemas que plantea esta descripción consiste en explicar qué sucede en el punto medio de cada ciclo, cuando la expansión se convierte en una contracción. Esta expansión puede estar conectada con la dirección del tiempo, y éste puede asumir diversas propiedades a medida que el Universo llega al punto en el que finaliza la expansión y comienza la contracción. Con objeto de entender este fenómeno, es preciso concebir el tiempo como algo cuyas propiedades son plásticas, y no fijas. A continuación hay que analizar cómo se alterarían estas propie-

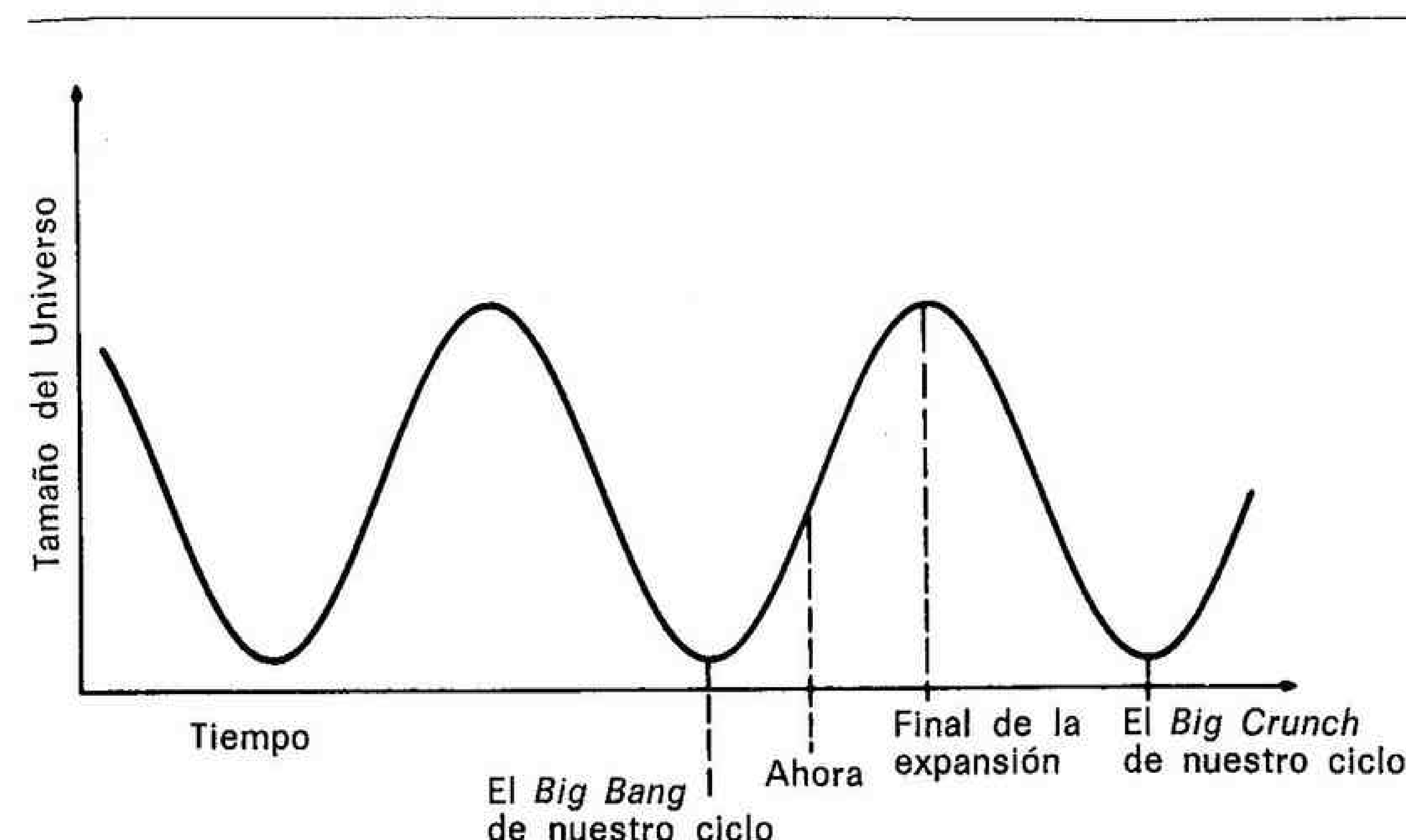


Fig. 9. Un Universo oscilatorio. Ésta sería la relación existente entre el tamaño de un Universo y el tiempo, en el caso de un Universo cuyo tamaño aumente y disminuya con periodicidad.

dades en el contexto del cambio desde la expansión a la contracción.

También se plantean problemas para comprender las etapas finales de colapso (y las iniciales etapas de expansión) del Universo, cuando los efectos cuánticos son de notable importancia, como en el caso de las fases finales de los agujeros negros. Todavía no sabemos cómo hemos de afrontar estos efectos, y por lo tanto no estamos en condiciones de determinar cómo se lleva a cabo el cambio desde la contracción a la expansión, y ni siquiera si se produce en realidad. Está haciendo falta una adecuada teoría cuántica de la realidad, que nos permita comprender diversos aspectos del Universo, entre los que se incluye éste. Es probable que el interés por estas cuestiones estimule la rápida formulación de una teoría de esa clase.

Algunos físicos indican que si el Universo se recicla realmente a sí mismo, el volumen de desorden debe aumentar en cada ciclo del Universo. Si esto es así, y ha habido una cantidad infinita de ciclos, entonces el Universo actual tendría que estar

muy desordenado. Para que nos sirva como analogía, imaginemos un recipiente lleno de bolas rojas y azules, que en un principio estaban separadas —de acuerdo con su color— en los dos lados de un recipiente. A continuación, imaginemos que las bolas se echan en otro recipiente, luego vuelven al anterior, y este proceso se repite de forma indefinida. En cada traslado se producirá cierta mezcla de las bolas, y después de numerosos traslados, estarán en completo desorden. Por lo tanto, si el desorden aumenta en cada ciclo del Universo, ello desafiaría la noción de un Universo que se reitera hasta el infinito, ya que en sus fases iniciales el Universo actual estuvo mucho más ordenado de lo que hubiera estado en caso de contener muchos agujeros negros.

En mi opinión, sin embargo, en el estado actual de nuestros conocimientos no sabemos si el desorden realmente tendría que aumentar en cada ciclo. Además, el problema de un grado relativamente elevado de orden en el Universo primitivo representa un problema general que hay que resolver, sea cual fuere el modelo correcto de Universo. Aún no estamos en condiciones de decir que sea incorrecto el modelo oscilatorio de historia del Universo, pero sería prematuro aceptarlo sin reservas.

Otros escenarios que hacen referencia a lo ocurrido antes del *Big Bang* no implican una secuencia interminable de expansiones y contracciones. Una idea de esta clase, por ejemplo, se basa en la posibilidad de que las «transiciones de fase» en el contenido del espacio hayan generado las altas densidades de partículas subatómicas que aparecieron inmediatamente después del *Big Bang*. El cambio en la densidad de energía provocado por un cambio en el nivel de campos cuánticos es tan grande que puede producir una transformación desde un espacio carente de partículas subatómicas, hasta un espacio que esté repleto de ellas. Por eso el propio *Big Bang* puede haber sido consecuencia de una transición de fase en un Universo previamente vacío de partículas. Si este enfoque es correcto, entonces las condiciones anteriores al *Big Bang* pueden haber sido de hecho mucho más sencillas que inmediatamente después, al igual que la disposición de los átomos en un cristal es mucho más sencilla que en el líquido que aparece cuando el cristal se funde. Esta interpretación del Universo anterior al *Big Bang* presenta sus propios problemas, entre los cuales se incluye comprender cómo y por qué han ocurrido las transiciones de fase. El problema de la prehistoria de nuestro Universo implica nociones procedentes tanto de la cosmología como de la teoría del campo cuántico, y los físicos apenas han comenzado a investigarla. En la física del futuro se convertirá en una cuestión cada vez más importante.

EL FUTURO A LARGO PLAZO DEL UNIVERSO

Los científicos han prestado una atención considerable a los orígenes del Universo, pero hasta tiempos recientes no se había pensado demasiado acerca de lo que ocurrirá en el Universo en un futuro lejano. Uno de los motivos por los cuales se ha dejado a un lado este tema es que hay pocas esperanzas de confirmar lo que se especule al respecto con datos procedentes de una observación empírica. No es probable que haya seres humanos que se dediquen a comprobar las predicciones sobre lo que va a suceder dentro de 100.000 millones de años. (Aunque tampoco podamos observar los fenómenos del pasado lejano, a menudo podemos extraer conclusiones correctas observando sus efectos en el presente.)

A pesar de todo, está comenzando a aparecer un tratamiento científico de la escatología, el estudio del final del Universo. Confío en que el análisis escatológico avance con rapidez y se transforme en una parte por derecho propio de la ciencia teórica. Sólo logrará convertirse en parte de la ciencia empírica observable en el caso de que ciertos aspectos del Universo se den cíclicamente en el tiempo. Si esto fuese así, las predicciones sobre las condiciones existentes en el futuro lejano de nuestro ciclo del Universo podrían comprobarse mediante un cálculo del influjo de tales condiciones sobre el ciclo siguiente, y comparando estas predicciones con lo que sabemos sobre las etapas primitivas del ciclo actual.

Las especulaciones acerca del futuro lejano del Universo son una manifestación de lo mucho que la mente humana puede extenderse en el espacio y en el tiempo. En parte, la ciencia nació con el propósito de contestar estas preguntas, y esto debería continuar aunque nadie fuese capaz de demostrar nunca la validez de las respuestas. Si se sigue siendo optimista sobre nuestra capacidad de modificar los aspectos indeseables del entorno a través de un esfuerzo inteligente —optimismo que yo poseo—,

también cabría sostener que dicha especulación puede ilustrarnos y advertirnos acerca de futuras catástrofes, que entonces podríamos tratar de evitar.

El futuro del Universo a largo plazo abarca al mismo tiempo la estructura global del Universo —por ejemplo, la distribución de la materia en las galaxias— y las propiedades de las partes individuales del Universo, desde las estrellas hasta las partículas subatómicas. Puesto que el Universo visible tiene una longitud de miles de millones de años luz, de ello se deduce que no se puede esperar que ocurra un cambio significativo en la estructura a gran escala del Universo en una magnitud temporal inferior a mil millones de años. Es posible que se produzcan con más rapidez determinados cambios en las propiedades de objetos más pequeños, por ejemplo, en las partículas subatómicas «estables» que otorgan visibilidad a la materia. En definitiva, sabemos que tales cambios tuvieron lugar con mucha rapidez en el Universo primitivo. Sin embargo, si nos dejamos guiar por la actual teoría de las partículas, se pone de manifiesto que —con una sola posible excepción, que expondré más adelante— también es de esperar que los cambios en el contenido de las partículas del Universo sólo ocurran en lapsos muy prolongados de tiempo. Por este motivo, centraré mi atención en el futuro a muy largo plazo del Universo.

En el momento presente, podemos establecer dos preguntas específicas cuyas respuestas influirán sobre nuestra imagen del futuro del Universo a muy largo plazo. Una de ellas inquiere si el Universo es finito o infinito. La otra —que ya se mencionó en el capítulo 1— se plantea si, en último término, los protones pueden llegar a transformarse en partículas con una masa inferior. Expondré el futuro del Universo en tres escenarios diferentes, que tienen en cuenta éstas y otras preguntas.

Escenario 1: Un pequeño Universo finito

El Universo sólo puede ser finito si en su interior hay materia suficiente como para curvar el espacio-tiempo de manera que se cierre sobre sí mismo. No sabemos si existe suficiente materia para conseguir tal cosa. Sí sabemos que el volumen de materia visible es por lo menos una décima parte de lo que se calcula que es necesario para que ocurra el fenómeno mencionado. Y

además, puede existir suficiente materia —invisible por el momento— que alcance el nivel requerido para que el Universo sea finito.

Parte de esta materia invisible puede existir en forma de neutrinos, partículas neutras que sólo establecen interacciones muy débiles. En el Universo existen neutrinos en cantidad suficiente como para que —si tuvieran una pequeña masa— suministrasen densidad de energía suficiente como para cerrar el Universo. Lo mismo podría darse en otras partículas subatómicas, desconocidas en la actualidad.

Si existe la cantidad de materia suficiente para que el Universo sea finito, entonces también habrá la suficiente para que la expansión acabe por detenerse y sea sustituida por una contracción. Si tal fuese la situación real de nuestro Universo, nos gustaría saber cuándo ocurrirá este cambio. No lo podemos establecer con precisión, debido a la falta de información acerca del volumen real de materia que hay en el Universo, pero cabe afirmar que no se producirá antes de mucho tiempo, tanto tiempo por lo menos como el transcurrido desde el *Big Bang* (10.000 ó 15.000 millones de años).

Se suele suponer que el tamaño de un Universo finito sólo sería unas cuantas veces mayor que el tamaño de la parte que conocemos en la actualidad, cuyo radio mide unos 10^{23} kilómetros. Sin embargo, no existe ninguna razón demostrable para creer tal cosa, basándose en la observación empírica o en la cosmología teórica. Si las cosas fuesen así, el Universo comenzaría a contraerse en el futuro en un momento no mucho más alejado de nosotros que el instante en que dio comienzo, de manera que podría decirse que nuestro Universo es de mediana edad.

Dentro de este escenario —al cual daré el nombre de Universo pequeño y finito— el futuro del Universo no depende demasiado de los detalles de la física de las partículas. Sabemos que no puede suceder nada que cambie demasiado las propiedades y la distribución de las partículas subatómicas del Universo a lo largo de las próximas decenas de miles de millones de años, hasta que la densidad de la materia se eleve mucho a través de una prolongada contracción del espacio-tiempo. Por ejemplo, sabemos que si los protones son inestables, tienen un período vital de por lo menos 10^{20} veces mayor que la edad actual del Universo. Por lo tanto, en el escenario que estamos ex-

poniendo, muy pocos protones podrían desaparecer antes de que el Universo se vuelva a contraer en el *Big Crunch*. También la conducta de partes integrantes del Universo mucho más grandes —por ejemplo, muchas estrellas y galaxias— permanecería tal como es en la actualidad durante el resto del período de expansión del Universo.

El estudio de la física de las partículas en sus relaciones con el futuro del pequeño Universo finito tiene interés únicamente en dos puntos: cuando la expansión se está invirtiendo y se va a producir un colapso, y cuando el colapso llega a sus etapas finales. Ya hemos hablado antes de estas «eras» en este mismo capítulo.

Mucho antes de que el colapso llegue a sus fases finales, quedarán destruidas todas las grandes estructuras materiales —por ejemplo, las estrellas, los planetas y sus habitantes— que existen en el Universo actual, debido al aumento de temperatura y densidad que tendrá lugar durante el período de contracción. Quizá la pregunta más importante sobre cualquier Universo finito es la de si hay alguna manera de que los seres inteligentes eviten ser atrapados por el *Crunch* final. Hasta los autores optimistas, como, por ejemplo, el físico norteamericano Freeman Dyson, han afirmado que esto probablemente no será así. Sin embargo, creo que ni siquiera dentro de este escenario el futuro definitivo de la inteligencia será del todo sombrío. Mi optimismo se basa en la noción de que el espacio-tiempo que habitamos no es todo el que existe, opinión que numerosos físicos han analizado seriamente, tanto en los espacio-tiempos finitos como en los infinitos. Por ejemplo, resulta irresistible desde el punto de vista intelectual pensar en que un «Universo» finito se halla inmerso en otro Universo más amplio, con una cantidad mayor de dimensiones, del mismo modo que la superficie bidimensional y finita de la Tierra se encuentra dentro del espacio tridimensional. En realidad, la descripción matemática de un Universo finito utiliza este tipo de integración en un espacio-tiempo de cinco dimensiones. Este enfoque de la noción de dimensiones adicionales es diferente al expuesto con anterioridad, porque aquí las dimensiones adicionales no poseen un ámbito minúsculo. Cabe imaginar que existan ambos tipos de dimensiones adicionales. Si hay dimensiones adicionales «grandes», somos libres de pensar que en este Universo mayor existen otros reinos posibles, y que su evolución no tiene por qué ser paralela a la de

nuestro propio espacio-tiempo de cuatro dimensiones. En ese caso, podríamos llegar a descubrir alguna forma de viajar entre los diferentes espacio-tiempos, y evitar ser aplastados por la última contracción de nuestro espacio-tiempo.

En el momento actual, esto no es más que una trama de ciencia ficción. Sin embargo, si existen otras dimensiones además de las que ya conocemos, o espacio-tiempos de cuatro dimensiones además del que habitamos, creo que sería muy probable que existan fenómenos físicos que sirvan de conexión entre ellos. Parece plausible que, si la inteligencia perdura en el Universo, en un lapso muy inferior a los muchos miles de millones de años que faltan para el *Big Crunch* logrará descubrir qué base tiene esta hipótesis y cómo sacarle partido.

Escenario 2: Un gran Universo finito

Según lo que sabemos sobre cosmología en la actualidad, es posible que el Universo sea finito, pero inmensamente mayor de lo que podemos observar en este momento. Esta posibilidad exige que la densidad de la energía del Universo sea ligeramente mayor que el volumen necesario para provocar el cierre del Universo.

Si tal es la situación real, el Universo continuará expandiéndose durante un lapso mucho mayor que el que ha transcurrido desde que comenzó a existir. Aunque finalmente se detenga y empiece a contraerse, ahora nuestro actual espacio-tiempo se encuentra en su infancia. El futuro a largo plazo del Universo dependerá del comportamiento de la materia, de manera que un Universo de este tipo tiene para los físicos mayor interés que el del escenario 1.

En un gran Universo finito, durante el prolongado período de expansión tendrían tiempo de entrar en funcionamiento procesos muy lentos que cambiarían el carácter de la materia del Universo. Los físicos han descubierto unos cuantos procesos hipotéticos de esta clase, todos los cuales actúan a escalas temporales mucho mayores que la edad actual del Universo, pero que podrían considerarse breves en comparación con su ciclo vital definitivo. Uno de estos procesos consiste en la ya mencionada transformación de los protones en partículas de menos peso, lo cual —si ocurre— exigiría por lo menos unos 10^{31} años de pro-

medio. Otra posibilidad es que los efectos de la mecánica cuántica provoquen que trozos de materia relativamente pequeños se aniquilen de forma espontánea en agujeros negros. Es difícil calcular con precisión el tiempo que tardará un acontecimiento como éste. Sin embargo, es probable que sea extremadamente largo, un tiempo mucho mayor aún que el necesario para que los protones desaparezcan. A medida que la gravedad provoca el colapso de algunas estrellas y galaxias, parte de la materia acabará con mayor rapidez en los agujeros negros.

Aunque se desconoce el destino último de los agujeros negros, a medida que éstos se evaporan lentamente la mayor parte de la materia que quedó atrapada en ellos se transformará en radiación a través del proceso concebido por Hawking. En consecuencia, se transformen o no los protones aislados en materias de menos peso, si el Universo continúa expandiéndose durante el tiempo suficiente, mucha de la materia que hay ahora en él acabará transformándose en fotones y en las demás partículas carentes de masa que puedan existir.

Existe todavía otra posibilidad, que es relevante en el caso de que el Universo contenga gran cantidad de neutrinos y de antineutrinos, u otras partículas de masa pequeña e interacción débil. Como los electrones y los positrones, estos neutrinos y antineutrinos —cuando chocan entre sí— pueden convertirse en fotones, proceso que recibe el nombre de aniquilación. El ritmo a que ocurre esto es bajo, pero si el Universo vive lo suficiente, se aniquilarán muchos neutrinos y antineutrinos. Según cierta teoría, la densidad de energía de estas partículas de interacción débil produce la gravedad que mantiene unidas las galaxias y los agrupamientos de galaxias. Si esto es verdad, la aniquilación de estas partículas podría conducir a la inestabilidad de las galaxias, que son los objetos más característicos de nuestro Universo actual. Parece probable, por lo tanto, que los objetos más familiares del Universo actual —desde los átomos hasta los agrupamientos de galaxias— no sean eternos. Desaparecerán en el futuro, si el Universo vive lo suficiente.

Este escenario no tiene por qué sorprendernos. Si los elementos más importantes del actual Universo están destinados a desaparecer, con toda seguridad serán sustituidos por algo nuevo. Por lo que sabemos acerca de la evolución del Universo, esto ha ocurrido varias veces anteriormente, cuando el Universo pasó de estar dominado por muchas especies distintas

de partículas a estar dominado por fotones, y luego por protones.

Algunos físicos han tratado de describir el Universo que aparecería después de que hayan desaparecido los protones, o los agujeros negros se hayan tragado a la materia tal como la conocemos. Estas consideraciones se aplican tanto al gran Universo finito del presente escenario (en la medida en que continúe en expansión) como al siguiente, en el cual el Universo es infinito y se expande indefinidamente. El análisis no es completo, pero nos indica que en un Universo futuro de esta clase perdurarían algunas formas de materia distintas a los fotones.

Los actuales protones de nuestro Universo se transformarían en positrones. Éstos podrían aniquilarse junto con los electrones ya existentes, para formar fotones. Sin embargo, el grado en que suceda tal cosa dependerá del ritmo de expansión del Universo, que —aumentando la distancia media entre las partículas— disminuye las posibilidades de aniquilación. Los análisis que se han formulado sugieren que muchos de los positrones se hallarán demasiado lejos de un electrón como para aniquilarse. En consecuencia, algunos positrones —y una cantidad igual de electrones— permanecerán indefinidamente. Lo mismo parece ocurrir con los neutrinos de masa finita, si es que existen tales partículas. En cualquier caso, estas partículas que perduran podrían formar estructuras estables más complejas, unidas por la gravedad o el electromagnetismo. Estas estructuras serán inmensamente mayores que los átomos habituales, y algunas pueden ser más grandes que todo el Universo actualmente observable.

La complejidad que pueden adquirir tales estructuras constituye un problema aún sin resolver. Es difícil analizarlo en detalle, debido a la enorme disparidad de escala entre las estructuras que nos son familiares, y todo aquello que surja en un Universo posterior. Sin embargo, este cambio de escala no carece de precedentes en la historia del Universo. En sus momentos primigenios, toda la región que acabó por evolucionar hasta el Universo actual era mucho más pequeña que un átomo, e incluso que una partícula subatómica. Si hubiese existido una inteligencia en funcionamiento en los primeros instantes del Universo, las estructuras habituales de nuestro Universo presente le parecerían tan enormemente extensas como nos lo parecen a nosotros los átomos supergalácticos del Universo en su fase final. Si disponemos a ello nuestra mente, la comprensión de la com-

plejidad existente en el Universo futuro no supera nuestra capacidad intelectiva. En mi opinión, la comprensión de dicha complejidad, y la solución de los problemas relacionados con ella, constituirán una nueva rama en la ciencia del futuro.

Si el Universo es finito, por muy grande que sea la expansión acabará por cesar y comenzará una contracción. Los detalles de lo que sucederá durante tal contracción serán muy diferentes a los del escenario 1, porque en ambos casos será distinto el contenido del Universo. A pesar de ello, el resultado final no es menos misterioso, ya que sabemos muy poco acerca de las fases de cambio y contracción. Si establecemos que el Universo es finito, desentrañar lo que vaya a ocurrir durante estas fases se convertirá en uno de los propósitos esenciales de la ciencia futura.

Escenario 3: Un Universo infinito

Si la densidad de materia es inferior a determinado volumen crítico, equivalente a unos 10^{-29} gramos por centímetro cúbico —unos diez miligramos en una región que tenga el tamaño de la Tierra—, el Universo es infinito y se expandirá para siempre. Por término medio, los objetos del Universo se irán separando cada vez más, salvo aquellos que se mantengan unidos por fuerzas como la de la gravedad, por ejemplo, el contenido del Sistema Solar. Como en el escenario 2, el contenido del Universo cambiará, y su forma definitiva dependerá de propiedades actualmente desconocidas de las partículas subatómicas, y del estado final de los agujeros negros. En conjunto, el futuro del Universo en el escenario 3 es aproximadamente igual al del escenario 2, excepto en que la expansión jamás equivale a cero ni se invierte. En el Universo del escenario 3 los fotones, los electrones, los neutrinos y sus antipartículas se dispersan de forma cada vez más tenue en regiones cada vez más extensas del espacio. Una vez más, sin embargo, no sabemos si la gravedad y el electromagnetismo permitirán que estos objetos formen estructuras complejas, capaces de persistir de manera indefinida.

No obstante, en nuestro rompecabezas falta una pieza, una pieza que también podría aplicarse al gran Universo finito. La mayoría de los modelos cosmológicos han supuesto que el Universo es homogéneo, es decir, que todas sus partes son iguales,

incluso aquellas que se encuentran más allá del alcance de nuestros telescopios y que, por lo tanto, no conocemos. Se ha efectuado la suposición de homogeneidad con objeto de simplificar la descripción matemática que los físicos atribuyen al Universo.

En época reciente se ha puesto en tela de juicio tal suposición. Hemos visto que los físicos creen que algunos rasgos del Universo actual dependen de la simetría rota que tuvo lugar en el Universo inicial. Sin embargo, esta ruptura de la simetría no necesariamente tuvo que producirse de manera uniforme en el conjunto del espacio-tiempo. Al igual que durante el invierno un lago puede tener zonas sólidas y zonas líquidas, las diferentes regiones del espacio pueden hallarse en diferentes fases, que implicarían diferentes propiedades físicas en la materia que haya en él. Por ejemplo, el exceso de lo que llamamos materia en nuestro Universo visible podría sustituirse por volúmenes iguales de materia y antimateria, o por un exceso de antimateria, en partes del espacio-tiempo que estén más allá de nuestro horizonte actual.

Estas reflexiones adquieren una forma muy precisa en un modelo cosmológico determinado, que ha propuesto hace poco el físico norteamericano Alan Guth. Según este modelo, denominado Universo inflacionario, la totalidad del Universo visible —y gran parte del espacio-tiempo que hay más allá de él— se originó a partir de una pequeña burbuja en los momentos primigenios del Universo. Esta burbuja contenía un nivel elevado de campos cuánticos, que la sometieron a una expansión mucho más acelerada de lo que cabe imaginar de acuerdo con la teoría estándar del *Big Bang*, donde la expansión sólo se ve influida por la presencia de partículas subatómicas. La rápida expansión diluyó el contenido material de nuestro Universo hasta llegar a una densidad muy baja, y ninguna de las partículas existentes en el Universo antes de esta «inflación» perdura en la actualidad. En cambio, la materia del Universo presente fue producida por una transición de fase al final de la inflación. En dicha transición se convirtió en partículas parte de la energía contenida en los campos de origen. Dentro del Universo inflacionario, el espacio-tiempo situado más allá del volumen de expansión de la burbuja original sería muy distinto del espacio-tiempo interior a dicho volumen. En este modelo las diferentes regiones del Universo se parecen algo a las diferentes culturas

que se desarrollan con independencia unas de otras, e ignorando la existencia de las demás.

En el momento actual no tenemos conciencia de la situación en el exterior de nuestra burbuja, porque desde el comienzo del Universo todavía no ha habido tiempo suficiente como para que llegue hasta nosotros una luz originada en el interior. Si el Universo continúa existiendo indefinidamente, acabaremos por ser conscientes de estas regiones externas del espacio-tiempo, y descubriremos que en ellas la materia y la energía tienen propiedades muy diferentes a las que nos son familiares.

Volvamos ahora a la perspectiva según la cual las propiedades de las partículas cambiarán lentamente, a medida que se expande el Universo. Algunos científicos han efectuado la predicción de que en el futuro tendrán lugar rápidas transiciones de fase, semejantes a las ocurridas en el Universo inicial. Esto podría suceder si la actual configuración de campos cuánticos en nuestra región de espacio posee más energía que otra configuración, y por lo tanto se muestra inestable con respecto a la transformación en una configuración con menos energía, como una roca que se balancea al borde de un precipicio.

Si se dan tales fases de transición, es de esperar que comiencen en un lugar determinado —quizá como consecuencia de una fluctuación aleatoria— y que a continuación se dispersen a la velocidad de la luz, para abarcar finalmente todos los puntos del espacio. Como la transición atraviesa todos los puntos, debido a las nuevas condiciones tendrían que cambiar súbitamente aquellas propiedades de la materia que dependan de los campos cuánticos de origen que estén presentes allí. Un cambio repentino en las propiedades de las partículas subatómicas provocaría enormes cambios en todas las estructuras formadas por ellas, y es improbable que tales estructuras perduren. Se ha llegado incluso a señalar que este cambio de fase ha comenzado ya en otro sector del Universo, y ahora se está aproximando a nosotros a la velocidad de la luz. Pero esta posibilidad no ha sido demostrada empíricamente, y es necesario que la analicemos con más profundidad antes de añadirla a la lista de catástrofes ambientales por las que preocuparnos.

Si el Universo continúa expandiéndose el tiempo suficiente para que la materia que hay en su interior cambie drásticamente de forma, las criaturas inteligentes pueden desempeñar quizás un papel más importante —en un futuro lejano— de lo que sería el caso en un Universo que acabase contrayéndose. Esos seres inteligentes habrán de afrontar dos problemas: la desaparición de los protones y de los neutrones unidos a ellos que forman la base material de la mayoría de estructuras del actual Universo, y los volúmenes cada vez menores de energía libre que estarían disponibles para preservar el orden en cualquier tipo de estructura que pudiera sustituirlos. Aún no han aparecido soluciones convincentes de estos problemas, pero como los hemos empezado a estudiar hace pocos años —y no necesitaremos las respuestas antes de unos 10^{30} años, poco más o menos—, no hemos de desesperar.

¿QUÉ FORMAS TOMA LA MATERIA?

Los físicos consideran que los campos cuánticos son la realidad subyacente a nuestra descripción de la materia. Tal descripción es elegante por muchos conceptos, y concuerda con la mayoría de las cosas que hemos observado acerca de las partículas subatómicas. Sin embargo, en su forma presente la teoría del campo cuántico aún muestra deficiencias.

En la descripción matemática de la materia hay que introducir un campo cuántico independiente para cada uno de los quarks y de los seis leptones conocidos (partículas del tipo de los electrones y los neutrinos). Hay que introducir otros campos para describir otras partículas subatómicas —por ejemplo, los gluones y los fotones— que entran en interacción con los quarks. Incluso este gran número de campos representa una reducción sustancial de la perspectiva existente en la década de 1960, cuando se creía que había centenares de partículas elementales, cada una de ellas asociada con su propio campo cuántico. Sin embargo, muchos físicos se sienten incómodos con la gran cantidad de objetos distintos que continúan interviniendo en nuestra descripción matemática de la naturaleza. Además, las ecuaciones que describen la conducta de los campos cuánticos contienen numerosas constantes numéricas —por ejemplo, las masas de las partículas— cuyos valores no han sido determinados por la teoría, y que por lo tanto hay que obtener mediante un experimento. Los estudiosos de las partículas saben ahora con claridad que no hemos logrado aún una teoría acerca de la estructura de la materia que sea del todo aceptable.

Sin embargo, seguimos intentándolo. Una hipótesis es que los quarks y los leptones sean en sí mismos objetos compuestos. Si lo son, las cosas parecerían mucho menos complejas. Los objetos realmente fundamentales serían una cantidad más pequeña de partículas —aún más simples que los quarks y los leptones— y cada quark o leptón contendría algunos de estos elementos constituyentes. Éstos estarían asociados con los campos cuánticos, y habría menos campos que en la actual descripción.

Las teorías de este tipo —que sirvan como modelo— no son difíciles de proponer. En ellas las partículas fundamentales individuales que se unifican poseen una masa muy elevada, pero forman compuestos con una masa reducida. Sin embargo, hasta ahora tales teorías no han formulado ninguna predicción que llame la atención. Si resultase que los quarks y los leptones son de veras objetos compuestos, este avance no sería más que una extensión del proceso por el cual comprendimos que los neutrones y los protones estaban formados por quarks. Cabe creer que la naturaleza sea más ingeniosa que esto.

Dentro del marco de la simetría interna —que se describió en el capítulo 1— existe otra posibilidad. Es posible considerar el gran número de quarks, leptones y otras partículas distintas como aspectos de un *mismo* objeto, relacionadas entre sí por una simetría global de grupo. Esto no hace disminuir la cantidad de campos cuánticos diferentes, pero justifica la existencia de esa cantidad específica de campos. También puede ayudarnos a comprender los valores numéricos específicos de ciertas propiedades de los campos cuánticos y de sus partículas asociadas.

Muchos físicos teóricos están dedicados a investigar en este terreno. La versión de dicha investigación con mayor número de partidarios en la actualidad implica relacionar los campos asociados con partículas como los quarks a campos asociados con partículas como los fotones, aunque tales campos difieran considerablemente en sus descripciones matemáticas. El motivo de la diferencia es que las partículas del tipo de los fotones —asociadas con un tipo determinado de campo— prefieren estar juntas, mientras que las asociadas con el otro tipo de campo (los quarks y los electrones) prefieren rechazarse recíprocamente. Además, el espín de los quarks es 1/2 unidad, mientras que el de los fotones es de 1 unidad; esto también impone una diferencia en su descripción matemática. A pesar de todo, los físicos Bruce Zumino y Julius Wess han mostrado que los campos

asociados con estas partículas desiguales pueden ser tratados de un modo semejante.

El tipo de simetría que puede imponerse entre campos que describen partículas con un espín diferente ha sido denominado supersimetría. Los estudiosos de las partículas están realizando activos esfuerzos para construir teorías sobre las partículas subatómicas conocidas que satisfagan dicha supersimetría. Si este enfoque es el adecuado, las teorías que incluyan la supersimetría casi con seguridad predirán numerosos campos y partículas que hasta ahora no han sido descubiertos, sugiriendo así nuevos senderos de búsqueda a los físicos experimentales.

Aunque pudiésemos llegar a una descripción completa de las partículas y los campos que conocemos, junto con cualesquiera partículas y campos nuevos que estén implicados en esta descripción, aparecerán muchas sorpresas. La historia de la física de las partículas ha mostrado repetidas veces que las partículas subatómicas se descubren en familias que dan a conocer un conjunto de fenómenos relacionados. Sin embargo, es difícil inferir —a partir de lo que se conoce sobre una familia— algo acerca de la existencia de otras familias o de sus propiedades. El comportamiento de los quarks indica que aparecen en familias, cada una de las cuales contiene dos tipos de quark. Por ejemplo, una familia consiste en los dos tipos de quarks que han sobrevivido hasta la época actual del Universo, y con los cuales están formados los neutrones y los protones. Basándose en un estudio de los objetos que contienen primordialmente estos dos tipos de quark, hubiese sido casi imposible aprender algo acerca de los objetos que contienen quarks pertenecientes a otras familias. La existencia de estas otras familias sólo logró descubrirse produciendo directamente tales objetos. En el caso de los leptones se ha descubierto un patrón semejante. Dada la posibilidad de que existan familias no descubiertas cuyas masas sean demasiado elevadas para que las podamos producir en nuestros laboratorios en el momento actual, sería demasiado precipitado considerar que nuestro conocimiento presente acerca de las partículas y los campos agota los fenómenos que se dan en la física de las partículas.

Ni siquiera una teoría satisfactoria de las partículas que ahora conocemos estaría en condiciones de garantizar que no hay otras «islas» de fenómenos a la espera de ser descubiertas. Quizá haga falta llegar hasta un nivel más profundo de comprensión,

en el que las partículas y los campos cuánticos sean considerados como manifestaciones de algo más básico. Mediante una descripción de esta clase, podríamos mostrar que sólo puede existir un conjunto determinado de objetos con las propiedades generales de los campos cuánticos; a continuación, nos aseguraríamos de haberlos descubierto en su totalidad. Esto no constituye un sueño imposible. Se asemeja a la situación actual de la física nuclear, en la cual —en base a nuestra interpretación de los núcleos como sistemas unificados de protones y neutrones— estamos persuadidos de que sabemos cuáles son los núcleos que pueden existir como objetos estables.

Por el momento, sin embargo, no disponemos de una teoría subyacente de este tipo, por lo que hace referencia a los campos cuánticos y a sus partículas asociadas. Lo mejor que podemos hacer para determinar cuáles son los que existen es apelar a los datos empíricos. Ciertos argumentos empíricos resultan bastante sutiles, y no se limitan exclusivamente a la observación directa. Por ejemplo, muchos físicos están convencidos de que, basándose en un análisis de la forma en que deben haberse sintetizado el helio y el deuterio al comienzo del Universo, se podrá llegar a la conclusión de que sólo hay cuatro tipos de las partículas llamadas neutrinos. Si en el momento de formarse estos elementos hubiesen existido muchos más tipos de neutrinos, los neutrinos adicionales habrían influido en la expansión del Universo inicial de una manera que hubiese producido más helio del que se observa en la actualidad. Un análisis semejante, aplicado a la generación de una asimetría entre materia y antimateria al principio del Universo, quizá podría indicarnos cuántos tipos de campos cuánticos existieron entonces.

Todos estos análisis contienen gran cantidad de suposiciones, y en mi opinión, no son demasiado concluyentes. No queda otra opción que no sea continuar el proceso de búsqueda de nuevos campos y partículas bajo condiciones «nuevas», tales como una mayor energía de las partículas que entran en colisión. En épocas pasadas nuestra exploración de dichas nuevas condiciones siempre ha producido sorpresas, y la mayor de todas sería que este patrón dejase de existir.

Por desgracia, el método empleado para estudiar las partículas subatómicas durante los últimos cuarenta años se está volviendo extraordinariamente costoso, tanto en dinero como en energía eléctrica. Este método implica provocar colisiones de alta energía entre las partículas y estudiar los resultados del choque. Para buscar nuevas partículas que tengan una masa elevada y energía de reposo, es preciso que las partículas que entran en colisión para producirlas posean una energía cinética aún mayor. La producción de partículas de alta energía en grandes cantidades se efectúa mediante un tipo de aparato conocido por el nombre de acelerador de alta energía, que funciona ejerciendo fuerzas eléctricas y magnéticas sobre partículas con carga. El tamaño, el costo y las necesidades de energía del acelerador aumentan en la misma proporción que la energía deseada. Los aceleradores de mayores dimensiones que existen en la actualidad cuestan unos cien millones de dólares y tienen un radio de aproximadamente un kilómetro. Los físicos hablan ahora de futuros aceleradores que costarán varios miles de millones de dólares y que tendrán radios de 10 kilómetros (fig. 10). Estos aceleradores utilizarán una potencia de centenares de megavatios, igual que una ciudad de 100.000 habitantes. Si se construye un acelerador de esta clase, nos permitiría estudiar partículas que tengan masas diez veces mayores que las que ahora conocemos. Esto constituiría una ampliación muy conveniente de nuestro conocimiento actual, pero resulta inevitable aceptar que este proceso está llegando a su fin natural, y que hay que encontrar otros métodos para estudiar procesos de alta energía.

Sean cuales fueren nuestros avances en la reducción o la expansión del número de partículas fundamentales o de campos cuánticos, en nuestra descripción de la materia hay otros problemas que exigen un nuevo enfoque. Dentro de las ecuaciones conocidas de la teoría del campo cuántico quizá sean posibles nuevas simplificaciones en nuestra descripción de la materia. Mencionemos unos cuantos ejemplos.

El principio de exclusión de Pauli es una propiedad importante de algunas partículas subatómicas, entre las que se cuentan los electrones y los quarks. Fue descubierto en la década de 1920, y afirma que dos electrones (o dos partículas cualesquiera del mismo tipo, con un espín igual a 1/2, 3/2, etc.) no pueden tener exactamente el mismo conjunto de propiedades al mismo tiempo. Por ejemplo, si dos electrones poseen el mismo momento lineal, deben tener una opuesta dirección de espín. Durante mucho tiempo se creyó que si un tipo de partícula se ajusta al principio de exclusión de Pauli, habría que asignarle una propiedad matemática específica al campo cuántico utilizado

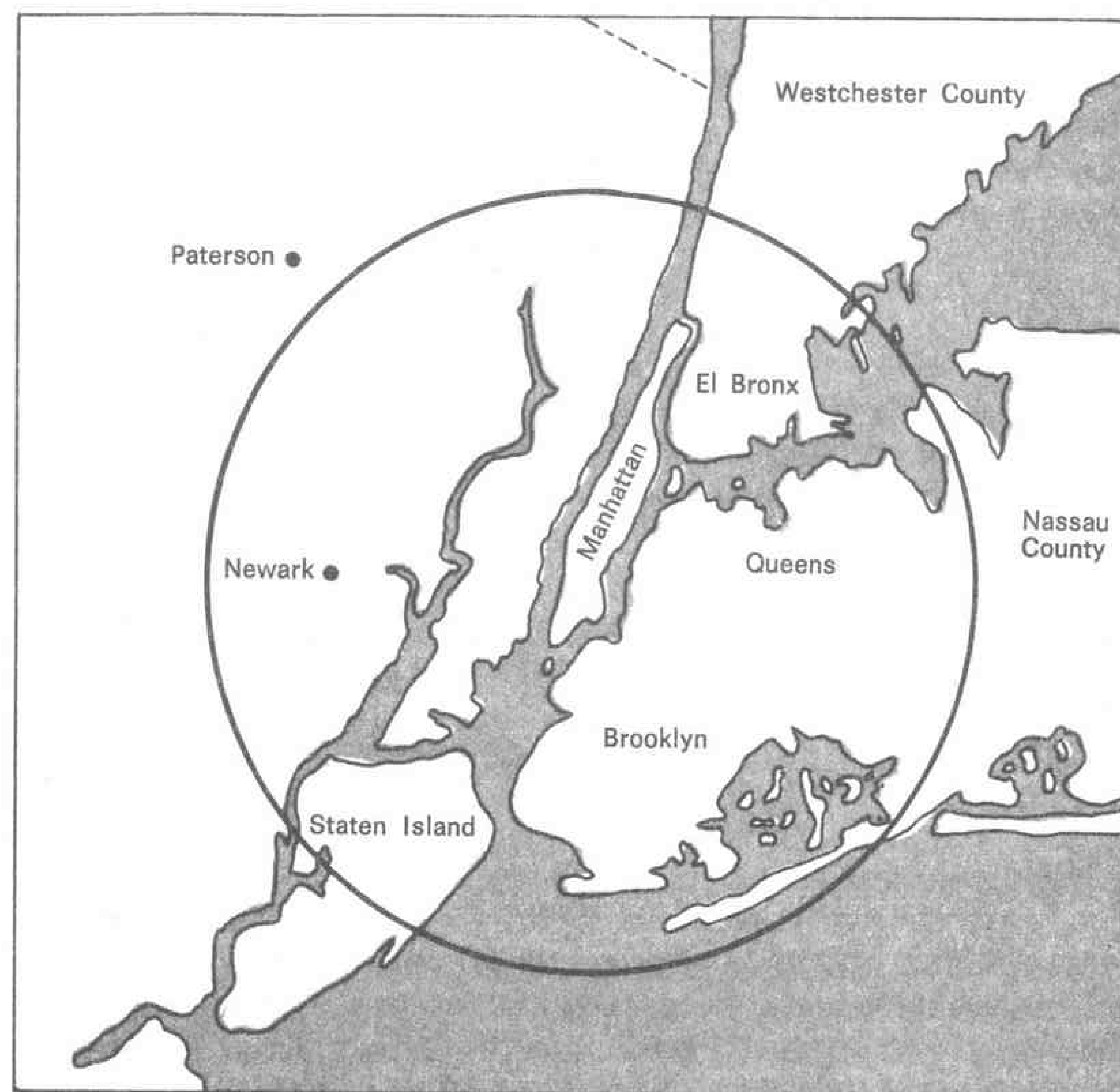


Fig. 10. Escala de un proyecto de nuevo acelerador. El tamaño del anillo de un nuevo acelerador de partículas de 10 Tev × 10 Tev está representado por el círculo colocado encima de un mapa del área metropolitana de Nueva York.

para describir la partícula. Sin embargo, recientemente se ha descubierto que las ecuaciones formuladas para describir campos correspondientes a partículas que no se ajustan al principio de exclusión a veces poseen otras soluciones, que se comportan como las partículas que sí se ajustan a dicho principio. Quizás esto también ocurra en las partículas como los electrones y los quarks. En este caso, podríamos disminuir la cantidad de ele-

mentos independientes que entran en nuestras descripciones porque no necesitaríamos introducir campos específicos para describir tales partículas. Esto constituiría un paso considerable hacia la simplificación, ya que no sólo se reduciría la cantidad de entidades elementales, sino también el número de propiedades elementales. Se han utilizado nociones semejantes para explicar cómo surge la propiedad de espín de una teoría que no la incluye desde el primer momento. En mi opinión, esta clase de reducción en la cantidad de propiedades elementales es más prometedora que la reducción del número de entidades elementales en lo que se refiere a la simplificación de nuestra descripción del Universo. Confío en que más adelante se encuentren otros ejemplos de esta tendencia.

Las ecuaciones de la teoría del campo cuántico también pueden contener información inesperada acerca de objetos que aún no se conocen. Estas ecuaciones pueden tener soluciones que describan entidades cuya existencia no fue sospechada por quienes formularon las ecuaciones ni por los científicos experimentales. Aunque se puede introducir un campo cuántico específico para describir una sola partícula subatómica, las ecuaciones que se cumplen en este campo quizá lleven a la conclusión de que este mismo campo posee otras manifestaciones distintas de esta partícula. Un ejemplo de ello son los campos «de fondo» expuestos en el capítulo 1, cuyo nivel global determina las simetrías existentes en las partículas subatómicas.

A veces, cuando se introduce un campo cuántico para describir una partícula, hay soluciones a las ecuaciones que describen este campo que poseen las propiedades correctas para describir partículas completamente diferentes, sean conocidas ya o estén aún por descubrir. Así, por ejemplo, se reconoció que un conjunto de campos —introducido para describir interacciones de quarks y de leptones— también pueden manifestarse como monopolos magnéticos. Éstos son un tipo de objeto —aún no observado— que actuaría como origen de campos magnéticos, del mismo modo que las cargas eléctricas son el origen de los campos eléctricos. Aunque ya se había conjeturado con anterioridad la existencia de los monopolos magnéticos, se pensó que para describirlos serían precisos campos adicionales. Las ecuaciones que creamos para expresar algunos aspectos de lo que conocemos a menudo nos sorprenden con la descripción de otros aspectos del Universo, conocidos o desconocidos.

Este rasgo del pensamiento científico no es algo nuevo. Hacia 1870 James Clerk Maxwell formuló una serie de ecuaciones para describir las fuerzas electromagnéticas, y descubrió que esas mismas ecuaciones también describían todas las propiedades conocidas de la luz. Hacia 1885 el físico alemán Heinrich Hertz se dio cuenta de que tales ecuaciones implicaban la existencia de lo que ahora llamamos ondas de radio, desconocidas hasta entonces. El físico P. A. M. Dirac descubrió en 1927 un conjunto de ecuaciones que describían los electrones giratorios, y comprobó que también predecían la existencia de la antipartícula del electrón, el positrón, que fue observado empíricamente varios años después. Los físicos quizá no tendrían que sorprenderse de que nuestras ecuaciones tengan un alcance más amplio que el esperado por sus creadores. Tales ecuaciones son a menudo el resultado de procesos de pensamiento inconsciente y de intuiciones vagas, más bien que de construcciones rigurosamente lógicas e inferidas directamente de un experimento. Debido a ello, las ecuaciones contienen más de lo necesario para describir de manera estricta los fenómenos conocidos. Esto también es así en las ecuaciones de la teoría del campo cuántico, y si se elaboran con creatividad las consecuencias de tales ecuaciones se obtendrán sin duda nuevas perspectivas en física.

También es posible que en el futuro la teoría del campo cuántico no sea el único enfoque para la descripción de la materia. Los campos cuánticos sólo son uno de los tipos de estructura matemática que puede utilizarse para satisfacer las exigencias de la mecánica cuántica y de la teoría especial de la relatividad. Algunos fisicomatemáticos ya han descubierto otras posibles expresiones coherentes con tales exigencias. Por ejemplo, las estructuras llamadas «cuerdas» (porque alguna de sus propiedades hacen recordar a una cuerda que vibra) son útiles para describir familias de partículas subatómicas cuya descripción requiere varios campos cuánticos distintos. También es posible que la mecánica cuántica relativista de estas cuerdas evite los problemas de las cantidades infinitas que entorpecen las ecuaciones de la teoría del campo cuántico.

Quizás una de las interpretaciones alternativas de la mecánica cuántica relativista prediga nuevos fenómenos. En realidad, ésta es una aplicación de las nuevas estructuras matemáticas más probable que la sustitución de los campos cuánticos en la descripción de las partículas subatómicas. También resultaría

más excitante para los científicos, que suelen estar más interesados en estudiar nuevos fenómenos que en descubrir una nueva explicación de los ya conocidos. Por este motivo, creo que vale la pena estudiar las consecuencias matemáticas de la mecánica cuántica relativista, aunque estas consecuencias no tengan una aplicación inmediata a los objetos y los fenómenos que ya conocemos. Este estudio constituye un sendero que nos conducirá al descubrimiento de lo que todavía no conocemos.

Por último, la estructura de la materia no es lo único que puede darnos sorpresas en el futuro. Uno de los más interesantes y recientes avances en física teórica ha sido el descubrimiento de que el espacio en sí mismo quizá tenga propiedades que influyan sobre las propiedades de las partículas subatómicas. No hemos ido muy lejos en la exploración de las propiedades del espacio en ausencia de la materia, pero confío en que un estudio de la teoría del campo cuántico nos sugiera nuevas posibilidades.

¿POR QUÉ EXISTE SIMETRÍA EN LA NATURALEZA?

Hace algunos años, un alumno que había realizado su tesis doctoral bajo mi supervisión estaba sometiéndose a su examen oral final. En la Universidad Columbia este examen tiene lugar ante un tribunal de seis miembros del claustro, dos de los cuales no son físicos. En este caso, uno de los dos era un eminente matemático. Antes de que le tocase su turno de formular preguntas, se había planteado cierto debate entre los miembros del tribunal y el alumno acerca de la teoría de grupos, una rama de las matemáticas muy empleada en la física contemporánea de las partículas. A continuación, el matemático preguntó al alumno, con toda inocencia: «¿Por qué puede aplicarse a la física la teoría de grupos?» Evidentemente, el examinando nunca se había planteado este interrogante. El matemático retiró su pregunta como algo no relevante para la tesis en cuestión, y el alumno obtuvo el título correspondiente. Sin embargo, el incidente me llevó a pensar sobre este tema, y saqué la conclusión de que el matemático estaba preguntando algo fundamental, que exigía una respuesta.

La utilización de la teoría de grupos en física está íntimamente relacionada con la noción de simetría. Hemos visto que

los grupos son estructuras matemáticas que se emplean para describir situaciones en las que existe simetría entre varios objetos, por ejemplo, entre partículas con propiedades relacionadas. Entonces, podríamos reformular así la pregunta del matemático: «¿Por qué son relevantes las simetrías en nuestra descripción de la naturaleza?»

Un físico respondería que en los fenómenos que observamos existe realmente simetría, y que nuestra descripción se limita a reflejar ese hecho. Probablemente esto no es toda la verdad. Así como nos hemos visto llevados a preguntar por qué el espacio es tridimensional, debemos preguntarnos si la existencia de simetría en la naturaleza es algo fundamental, o es consecuencia de algún otro fenómeno. Ciertas versiones de esta cuestión han aparecido ya en nuestro anterior debate sobre cómo la aparente simetría involucrada por la teoría de la relatividad puede mostrarse coherente con una estructura granular del espaciotiempo.

Es posible que la simetría sólo sea relevante para los fenómenos que se produzcan a una escala lo suficientemente grande, por ejemplo, los que tienen lugar en las partículas subatómicas conocidas, pero que a una escala mucho menor no exista tal simetría. Imaginemos, a título de ejemplo, una esfera de cuarzo perfectamente pulida, que tenga un centímetro de diámetro. Si se hace girar esta esfera en torno a un eje, a simple vista sus propiedades no parecen cambiar. Se trata de una forma sencilla de simetría. Sin embargo, contemplada a través de un microscopio, se ve que la superficie de la esfera tiene numerosas protuberancias y depresiones, y la mayoría de los giros causarán una disposición diferente de estos rasgos de la superficie, de manera que no existe una perfecta simetría en la rotación (fig. 11). La aparente simetría sólo se da porque nuestros sentidos no pueden distinguir entre aquellas rotaciones que no afectan la superficie, y aquellas que sí la cambian. Ésta no es la única explicación posible sobre cómo se producen las simetrías espaciotemporales en la naturaleza. Ya han sido propuestas otras, que serán objeto de estudio en el futuro.

La pregunta acerca de la simetría se vuelve más acuciante cuando reflexionamos sobre los grupos de simetría interna que los físicos utilizan para describir los campos cuánticos y las partículas. Como hemos visto, aún no se ha determinado con claridad cuál es la simetría correcta para este propósito. En conse-

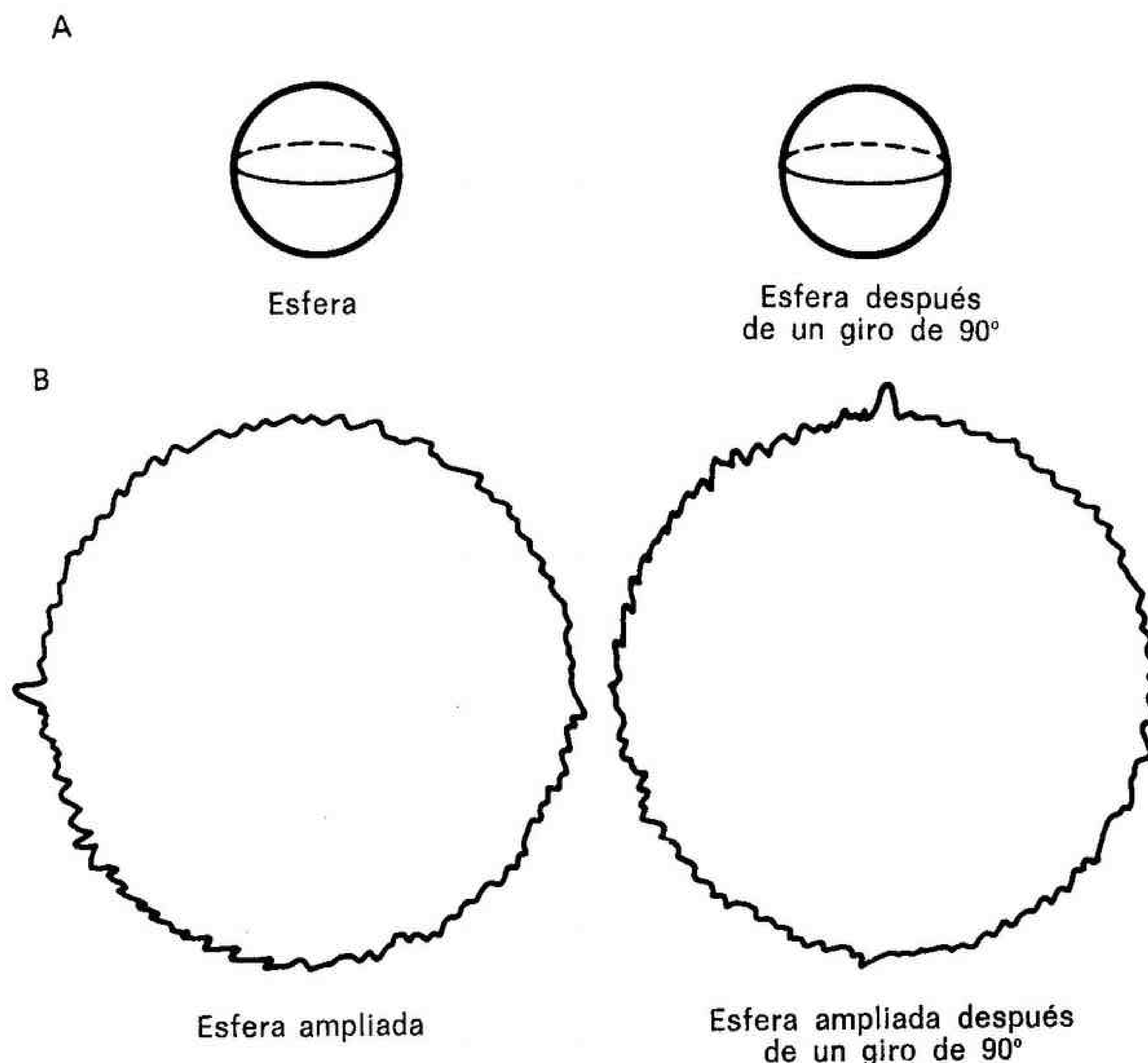


Fig. 11. La simetría de una esfera. En *A* se representa una esfera, junto con la misma esfera después de un giro de 90 grados. A través de una observación a esta escala, no se puede ver ninguna diferencia, y se dice que la esfera permanece invariada después de la rotación. En *B* se representa con gran aumento la misma esfera, antes y después del giro. Puede apreciarse que a esta escala la simetría de rotación ya no es perfecta, puesto que cambian de posición muchos rasgos de la superficie.

cuencia, se plantea un interrogante obvio: ¿es relevante para la naturaleza una simetría de esta clase, y si lo es, por qué? En realidad, si pudiésemos contestar estas preguntas, ello nos llevaría a la simetría adecuada en sí misma.

Los científicos han enfocado de diversas maneras la pregunta acerca de por qué existen simetrías de grupo. En realidad, muchos piensan que los grupos de simetría son lo fundamental, y consideran que los campos relacionados por ellos sólo son la manifestación de una realidad matemática de carácter abstracto. Los físicos que comparten este punto de vista se dedican a buscar grupos con una simetría interna mayor y más perfecta, que impliquen más relaciones entre los campos cuánticos. Una vez identificado el grupo de simetría adecuado, los campos existentes serán precisamente aquellos que se requieran en este grupo. Según este enfoque, el motivo de la existencia de una simetría interna es mucho más fundamental que la cuestión referente a cuáles son los campos existentes, y hay que buscarlo en otra parte.

Otros físicos consideran que la realidad primaria consiste en la existencia de determinados campos. Creen que, si tales campos primarios llegan a ser identificados, aparecerá por sí misma una elección natural del grupo de simetría. Por ejemplo, si hubiese motivos para creer que hay exactamente tres campos fundamentales, y que todas las partículas subatómicas constituyen manifestaciones de dichos campos, sería lógico pensar que las simetrías internas están basadas en operaciones matemáticas efectuadas sobre estos tres campos. En esta descripción, la existencia de simetrías internas es una noción secundaria con respecto a la existencia de campos fundamentales. Aunque esto no constituye una respuesta completa a la pregunta sobre por qué existe una simetría interna, reduce las áreas en las que puede hallarse tal contestación.

También es posible que las simetrías internas y las simetrías espaciotemporales estén más estrechamente relacionadas de lo que ahora pensamos, y que ambos tipos tengan un origen común. Puede haber una única simetría de fenómenos naturales a nivel subatómico, que se manifieste a sí misma como simetrías espaciotemporales y como simetrías internas. Justamente esto es lo que sugieren algunas de las teorías de mayor alcance antes expuestas.

La noción de simetría ha sido uno de los conceptos más fecundos en la física del siglo XX, y continuará siéndolo. Sin embargo, siempre debemos estar preparados para interrogarnos sobre los orígenes de nuestros avances científicos, y para examinar los límites de su aplicabilidad. Está empezando el estudio de

los orígenes de la simetría en física, pero creo que se convertirá en una importante área de investigación en la física teórica del futuro. Puede ser uno de los senderos que nos lleven a conocer los niveles más profundos de la estructura de la naturaleza.

4. LA MOLÉCULA Y LA BIOSFERA: LOS BIÓLOGOS REFLEXIONAN SOBRE LOS ENIGMAS DE LA VIDA

Los biólogos poseen una comprensión bastante correcta acerca de las funciones básicas que se dan en las formas de vida unicelular, por ejemplo, en las bacterias. Esta comprensión se basa en la bioquímica de las proteínas y de los ácidos nucleicos, que desempeñan un papel esencial en todos los seres vivientes. Los biólogos también comprenden gran parte del comportamiento de los organismos de mayores dimensiones, por ejemplo, la forma en que los seres humanos digieren los alimentos.

Sin embargo, dentro del panorama general de la biología existen grandes zonas sobre las cuales se sabe muy poco. Un grave problema aún por resolver es la forma en que aparecieron por primera vez las criaturas unicelulares, es decir, la pregunta acerca del origen de la vida. En el caso de los organismos multicelulares, se plantea la pregunta sin respuesta sobre cómo una única célula huevo fecundada puede convertirse en un organismo complejo. En relación con esta pregunta acerca del desarrollo, encontramos la que hace referencia al envejecimiento: ¿por qué todas las criaturas multicelulares pasan por un proceso de senilidad que acaba en la muerte? Me centraré en estas tres preguntas, pero en biología existen muchos otros interrogantes abiertos, probablemente más que en física, y sólo voy a mencionar brevemente otros dos.

Estas dos preguntas hacen referencia a dos de los aspectos más complejos de los organismos más desarrollados. Una versa sobre el sistema inmunitario, sistema de notable sofisticación que poseen algunos organismos multicelulares. Este sistema otorga a cada organismo una definición bioquímica de carácter

individual, y le ayuda a protegerse de los continuos ataques del entorno. Cómo funciona el sistema inmunitario, y cómo lo controla la estructura genética de un organismo, son preguntas que se encuentran en primera línea de una gran parte de la investigación biológica contemporánea.

Otro sector poco conocido de los organismos complejos es el sistema nervioso, que coordina la mayoría de las interacciones de cada organismo con su entorno, y que en los seres humanos proporciona otra manera de distinguir a cada individuo. Los biólogos están aún muy lejos de comprender en detalle las funciones de estos sistemas, o la manera en que hay que interpretarlos desde el punto de vista de las células y de sus interacciones. Estas preguntas abiertas —y las que a continuación examinaremos detalladamente— suponen una gran tarea para los biólogos del futuro.

EL ORIGEN DE LA VIDA SOBRE LA TIERRA

Ha habido vida sobre la Tierra por lo menos durante unos cuantos miles de millones de años. Presumiblemente hubo una época —inmediatamente después de formarse la Tierra— en la que no existía vida en ella. Las condiciones físicas imperantes no permitían que se diesen las formas conocidas de vida. En cierto modo, la vida se desarrolló a partir de esta originaria carencia de vida.

Se han formulado muchas respuestas a esta pregunta acerca del origen de la vida, tanto dentro como fuera del marco de la ciencia. Los científicos han llegado a reproducir en el laboratorio algunos de los procesos químicos que pueden haber constituido los primeros pasos en el camino hacia la vida sobre la Tierra. A pesar de todo, ninguna de las respuestas que se han propuesto hasta ahora resulta demasiado satisfactoria. Será preciso efectuar una reflexión y una investigación mucho más amplias antes de que podamos saber cómo empezó la vida. Es curioso comprobar que —si bien algunos científicos eminentes, como, por ejemplo, el biólogo británico Francis Crick, han escrito sobre el origen de la vida— no hay muchos científicos que se dediquen a trabajar en este terreno, en comparación con la gran cantidad de expertos que trabajan en otros problemas fundamentales.

Los primeros seres vivos individuales que hubo sobre la Tierra fueron sin duda muy sencillos, probablemente más todavía que las bacterias y algas actuales. No tenemos pruebas de que existan organismos multicelulares más complejos desde hace más de mil millones de años, y la vida unicelular se remonta a tres mil millones de años por lo menos. No obstante, incluso el más simple de los seres vivientes resulta extraordinariamente complejo en comparación con los objetos del mundo inanimado.

Una de las maneras de expresar el problema referente al origen de la vida consiste en preguntarse cómo puede proceder de la materia inanimada algo tan complejo como una bacteria. La misma pregunta puede plantearse acerca de determinadas partes individuales de los seres vivos, por ejemplo, las cadenas de ácidos nucleicos portadoras de información genética, o las proteínas que catalizan los procesos químicos en todas las formas conocidas de vida. Resulta inimaginable que estructuras moleculares tan complejas como las proteínas y los ácidos nucleicos puedan surgir a través de un único encuentro al azar entre moléculas simples, aunque encuentros de esa clase estuviesen ocurriendo en todos los océanos de la Tierra a lo largo de mil millones de años.

Esto no significa —a pesar de lo que hayan sugerido algunos científicos, por ejemplo, Fred Hoyle— que tenga que buscarse una explicación divina o mística acerca del origen de la vida. No se pueden calcular con precisión las posibilidades de que se desarrolle una estructura compleja, suponiendo que esto ocurre mediante un único paso. Las estructuras inertes complejas que hay en la Tierra no se han formado mediante un único acontecimiento, a partir de estructuras más sencillas. El Gran Cañón del Colorado no se hizo de golpe, a partir de un simple lecho fluvial. Por el contrario, tales estructuras se desarrollan a lo largo del tiempo, como consecuencia de los numerosos y pequeños pasos que señalan paulatinamente el camino hacia el resultado final. En un proceso de esta clase, el resultado de los pasos anteriores actúa como factor determinante de los pasos posteriores, con mucha mayor fuerza que si éstos tuviesen lugar al azar. Las gotas de lluvia que caen sobre una superficie pueden formar al principio un patrón al azar, pero cuando parte de la superficie queda gastada por las gotas caídas con anterioridad, el patrón se encuentra muy alejado del puro azar.

Una aproximación plausible al origen de la vida consistiría

en descubrir cuáles son los eslabones de una larga cadena de reacciones químicas y procesos físicos, comenzando por las moléculas sencillas que podrían haberse sintetizado en la Tierra primitiva, y culminando con el tipo de complejidad química característica de los tipos de seres vivos individuales más sencillos que se conocen. Para lograrlo necesitamos saber algo más que química. Es probable que los primeros pasos hacia la vida sobre la Tierra hayan estado muy influidos por los rasgos que poseía el entorno en aquella época: grandes masas de agua, que pueden haber influido en la frecuencia de reacciones químicas; complejos depósitos minerales, que pueden haber actuado como catalizadores selectivos; y variaciones en la temperatura y la luz solar, que pueden haber influido en la clase de reacciones que se produjeron.

Entre los científicos no existe un acuerdo general acerca de cuáles eran las condiciones ambientales en la Tierra primitiva. Por consiguiente, el problema del origen de la vida hace referencia a una química compleja dentro de un entorno sobre el cual sabemos muy poco. Además, necesitamos efectuar un análisis general sobre la forma en que puede configurarse el orden a través de un gran número de pasos sencillos. Estos problemas son difíciles.

Varios científicos —entre los cuales estamos el bioquímico norteamericano Robert Shapiro y yo mismo— han sugerido que en el sendero que condujo a la aparición de la vida desempeñó un papel esencial una biosfera primitiva. Estos científicos han supuesto que los tipos de reacciones químicas y los ciclos por los que pasan los distintos materiales en la biosfera actual tuvieron precedentes en la historia primitiva de la Tierra, y que la complejidad química de la vida actual se desarrolló a través de la acción de estos ciclos primigenios a lo largo del tiempo. Desde esta perspectiva, los seres vivos individuales constituyen una expresión de la biosfera, y no al revés. La biosfera, por lo tanto, fue anterior a los seres vivos individuales en el desarrollo de la vida sobre la Tierra. Si esto es así, analizar cómo se desarrolla una biosfera en diversos entornos sirve como estrategia útil para estudiar el origen de la vida sobre la Tierra o en cualquier otro lugar del Universo. Este enfoque acerca del origen de la vida apenas está dando sus primeros pasos, pero confío en que se convertirá en una de las principales direcciones que seguirá la futura investigación en este ámbito.

Otra pregunta relacionada con el origen de la vida es la que se plantea si hay otras sustancias distintas de las proteínas y los ácidos nucleicos que puedan actuar como catalizadores y depositarios de información en los seres vivos. Todos los seres vivos que conocemos utilizan ácidos nucleicos para el almacenamiento y la transferencia de información, y utilizan proteínas como catalizadores químicos. Además, en la síntesis proteínica parece existir un código universal para la traducción de información. No obstante, no sabemos si existen otras sustancias que puedan desempeñar funciones semejantes en entornos distintos al terrestre, o si en la historia de la vida sobre la Tierra hubo algún período en el que tuvieron importancia biológica ese otro tipo de sustancias.

A lo largo de la evolución de los seres vivos, algunas especies o clases más amplias de criaturas existen durante un tiempo y luego desaparecen. Sus restos fósiles son lo único que nos recuerda que existieron en alguna época. Quizás ocurra lo mismo a una escala diferente. Un tipo específico de bioquímica puede haber desempeñado determinado papel en la evolución inicial, antes de que se desarrollase la bioquímica basada en las proteínas y los ácidos nucleicos. Cabe imaginar que lleguemos a encontrar «fósiles vivientes», microorganismos que utilicen aún hoy una bioquímica que no se base en los ácidos nucleicos y las proteínas. Nuestro conocimiento acerca de la población actual de la Tierra no es lo suficientemente amplio como para rechazar tal hipótesis. Una adecuada forma de ampliar nuestros conocimientos sería llevar a cabo un ambicioso programa de búsqueda de bioquímicas alternativas en la Tierra actual.

Incluso dentro de la bioquímica actual, abundan las preguntas sin respuesta acerca del origen de la vida. La mayoría de las moléculas que se encuentran en los seres vivientes se ajustan a sólo una de las dos estructuras estereoquímicas en que pueden sintetizarse en el laboratorio (fig. 12). No sabemos si esto es una consecuencia del entorno —un accidente provocado por las condiciones existentes en la Tierra primitiva, y que ha llegado hasta nosotros a lo largo de las distintas épocas— o si se trata de algo intrínseco a las moléculas, algo que no aparece en los experimentos simples, y que se vuelve evidente sólo en el transcurso de un largo proceso evolutivo. Tampoco sabemos por qué tienen que ser universales (o casi universales) las actuales reglas para traducir una secuencia de ácido nucleico en una se-

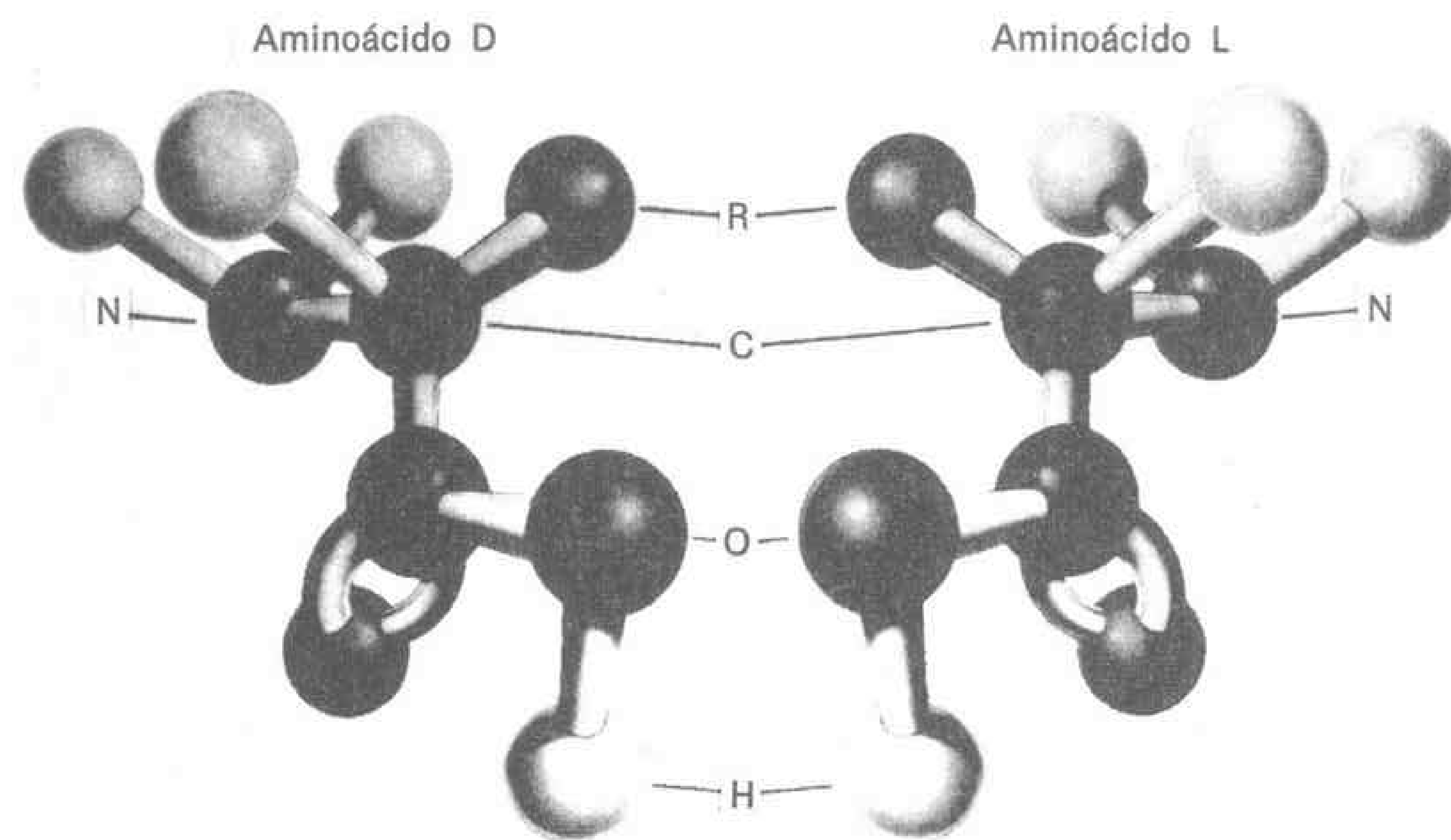


Fig. 12. Estereoisómeros. Pueden existir dos formas de aminoácidos, relacionadas según una imagen especular. Todos los aminoácidos biológicos conocidos toman la forma L.

cuencia proteínica. Quizás esto implique algún rasgo químico específico que se halle oculto, o también puede ser consecuencia de la fidedigna transcripción de un «accidente» originario en la evolución molecular.

Por último, no sólo necesitamos entender cómo evolucionó la química de la vida, sino también cómo han surgido ciertas estructuras físicas utilizadas por los seres vivientes. Algunos científicos han sugerido que el paso esencial hacia el desarrollo de la vida se produjo cuando se formó el primer depósito cerrado —o célula primitiva— permitiendo que en su interior actuase la bioquímica, relativamente a salvo del entorno. Estos científicos señalan que lo que había en el interior de tales células primitivas era menos importante que la existencia misma de las células, y que dentro de las células iniciales puede haberse dado una bioquímica muy diferente a la actual, pero lo suficientemente compleja como para ser calificada de vida.

Los métodos actuales de la biología y la química parecen adecuados para comprender la base molecular de la vida existente. Sin embargo, dependen en gran medida del estudio de

casos reales. Habría que comprobar si los mismos enfoques sirven para explicar cómo surgieron las peculiaridades moleculares de la vida existente, o para comprender las posibles alternativas. Estaríamos mucho más capacitados para obtener respuestas si lográsemos examinar procesos vitales alternativos, y para ello tendremos que buscarlos fuera de la Tierra. Creo que en un entorno extraterrestre podremos hallar datos que demuestren que hay otras soluciones bioquímicas al problema del mantenimiento de la vida.

EL DESARROLLO

Todos los seres vivientes multicelulares —y muchos de los unicelulares— atraviesan distintas fases a lo largo de su vida. Los cambios sistemáticos que tienen lugar durante la vida de un organismo reciben el nombre de proceso de desarrollo. Una de las partes más llamativas del desarrollo está constituida por sus etapas iniciales. La vida de los organismos multicelulares comienza con una única célula, que contiene el segmento de ácido nucleico en el cual se halla escrito el proyecto químico del organismo, en un código idéntico para todos los organismos. Pero en los organismos multicelulares además de especificar el modo en que debe funcionar la célula originaria, el ADN parece describir también la manera en que esa única célula debe multiplicarse en lo que acabarán por ser muchos billones de células, con una diversidad de funciones.

Uno de los interrogantes que plantea el desarrollo consiste en el grado en que el ADN determina efectivamente toda la secuencia de acontecimientos que tienen lugar a lo largo de la producción de un organismo adulto. Es posible que el ADN de la célula huevo fecundada contenga las instrucciones para cada una de las fases de desarrollo. También es posible que sólo contenga el plan referente a los primeros pasos, y que lo que ocurra después se halle determinado por el resultado de estos pasos.

En cualquier caso, uno de los problemas importantes de la biología es el de comprender los pasos a través de los cuales se produce el desarrollo, de una manera casi infalible, y con un resultado final diferente para cada especie. A diferencia del mecanismo de la herencia, cuyos rasgos esenciales podemos entender en la actualidad apelando a la bioquímica molecular del áci-

do nucleico, el mecanismo del desarrollo inicial sólo está sujeto a conjeturas. Se han aventurado hipótesis que van desde uno a otro extremo. Algunos imaginan que el desarrollo es otra compleja manifestación de la bioquímica del ácido nucleico y de las proteínas, mientras que otros proponen la improbable posibilidad de que intervengan elementos completamente nuevos, imposibles de imaginar a partir de lo que conocemos en el resto de la naturaleza, y que se rigen por leyes distintas a las de otros objetos físicos.

Aunque los mecanismos se entiendan muy poco, los biólogos han descubierto muchos de los pasos individuales del desarrollo, y han identificado algunos de los procesos moleculares o celulares que se hallan involucrados en él. Se sigue trabajando en este ámbito, y acabaremos por conocer todos estos procesos. Sin embargo, hay tantos pasos —y cada uno de ellos implica tantos mecanismos— que aunque los conociéramos todos no dispondríamos de una comprensión global del desarrollo.

Tal comprensión implicaría desvelar las relaciones existentes entre los elementos del desarrollo que surgen de las propiedades específicas del huevo fecundado, y los elementos que aparecen a través de la acción de leyes generales en las diversas etapas del desarrollo. Requeriría comprender la forma en que ocurre una cantidad muy numerosa de pasos, de un modo coordinado, de manera que produzca un resultado final de gran perfección: un organismo infantil que acabará siendo capaz de funcionar como un adulto. También exigiría discriminar cuáles son los aspectos esenciales de dicho proceso, y cuáles no lo son. No hay razón alguna para pensar que todos los aspectos del proceso de desarrollo son esenciales, como tampoco hemos de suponer que todos los aspectos de la estructura o la función de un organismo sirven a un propósito determinado. Algunos pueden haber sido importantes para algunos de los antepasados del organismo, y quizá la selección natural no haya tenido aún el tiempo o los motivos necesarios para eliminarlos. (El apéndice del hombre es un ejemplo muy conocido de este tipo de vestigios evolutivos.) Por último, la comprensión del desarrollo tiene que estar vinculada con algunos de los aspectos más desconcertantes de la biología molecular de las células eucarióticas, como, por ejemplo, la existencia de grandes segmentos de ácido nucleico que —por lo que sabemos— no se hallan codificados en relación con proteínas u otros elementos de la célula.

Una parte importante de la labor del biólogo consiste en fusionar muchos de los pasos individuales involucrados por el desarrollo, para llegar a un pequeño número de procesos que se puedan entender con más facilidad. Para ilustrar lo que hace falta aquí, podemos comparar los pasos del desarrollo con un programa informático. Un programa de esta clase posee diversos niveles. La descripción puede ser tan detallada como los cambios individuales que tienen lugar en las unidades de memoria del computador, o puede consistir en una descripción menos detallada —pero que sigue siendo compleja— con respecto a la serie de instrucciones que haya escrito un programador en un lenguaje de alto nivel, por ejemplo el Basic. En cualquiera de los dos niveles, disponemos de una completa descripción de los pasos individuales. No obstante, si el programa es largo y complicado pueden existir centenares o miles de pasos, y una descripción de ese tipo no será inteligible para alguien que no haya escrito el programa. Necesitamos algo que nos proporcione una descripción global de lo que hace el programa.

A menudo tal descripción asume la forma de ordinograma, que ilustra la secuencia lógica de los pasos importantes de un programa, y la manera en que se ajustan entre sí (fig. 13). En un ordinograma se fusionan en un solo gran paso gran cantidad de pasos individuales, y la cantidad de grandes pasos sigue siendo lo bastante reducida como para que la comprenda la mente humana. Contemplando un ordinograma, otro programador suele estar en condiciones de entender qué es lo que hace el programa, y a menudo lo puede reproducir. Para describir el complejo proceso del desarrollo necesitamos algo parecido a un ordinograma.

A continuación describiré algo de lo que sabemos y de lo que no sabemos en la actualidad, tanto acerca de los procesos individuales que ocurren durante el desarrollo como de los mecanismos que los producen, e ilustraré los avances realizados en la comprensión del desarrollo en su conjunto.

Es lógico considerar que el desarrollo inicial constituye la primera etapa del ciclo vital general del organismo. Las etapas posteriores son: el crecimiento, después de que el organismo comienza a funcionar por su cuenta; la metamorfosis, en aquellos organismos en los cuales se da este fenómeno, y el envejecimiento, o pérdida gradual de funciones a medida que pasa el tiempo. Es muy plausible que en todas las fases de desarrollo in-

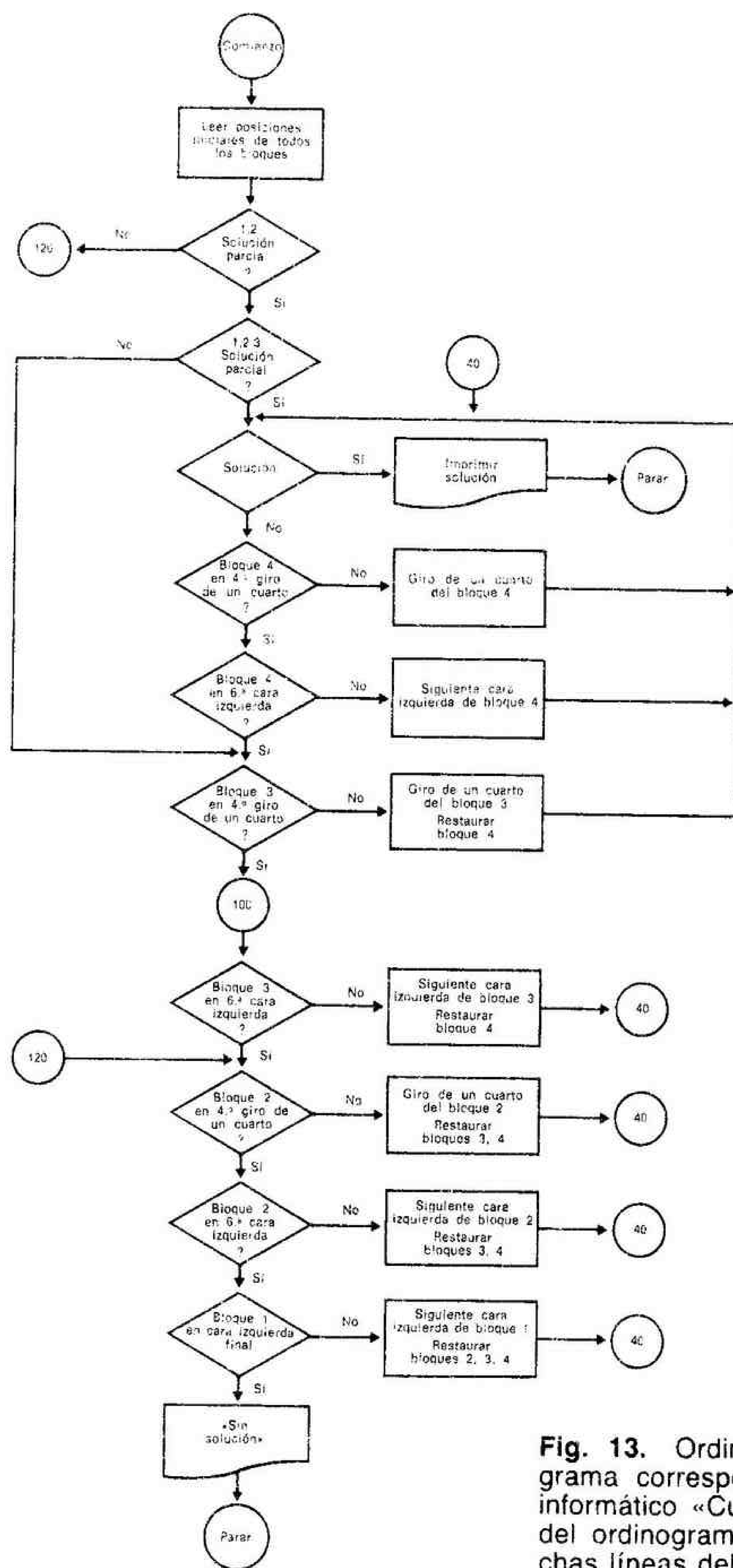


Fig. 13. Ordinograma del programa correspondiente al juego informático «Cubos». Cada paso del ordinograma representa muchas líneas del programa.

tervengan mecanismos semejantes, que se distingan quizá por diferentes escalas temporales y por diversos influjos ambientales. Como el desarrollo inicial (la embriogénesis) y el envejecimiento son los ejemplos más destacados de cambio, voy a centrar la atención en ellos.

Para comprender la embriogénesis, los biólogos tienen que comenzar por esclarecer los mecanismos que —a lo largo de un período que va desde días hasta meses, según las diferentes especies— transforman una célula huevo fecundada (un cigoto) en una masa constituida por billones de células distintas, que contienen en miniatura la mayoría de las partes integrantes —o todas ellas— del organismo adulto. Durante la embriogénesis ocurren varios cambios muy distintos entre sí. El más notable de ellos es el aumento en el número de células, que se produce mediante una división celular de un tipo no muy diferente al que tiene lugar durante la reproducción de los organismos más simples. Los otros dos cambios importantes que aparecen durante el desarrollo inicial consisten en la diferenciación celular —la producción de centenares de tipos diferentes de células, que aparecen en el organismo maduro— y la morfogénesis, la producción de la multitud de formas que se encuentran en el embrión y en el organismo maduro. Ambos procesos resultan mucho más difíciles de entender que la simple división celular.

La diferenciación celular

Los organismos complejos se hallan en condiciones de funcionar sólo porque sus componentes han pasado por el proceso de diferenciación celular. En un organismo multicelular maduro suele haber muchos tipos de células que llevan a cabo distintas funciones (fig. 14). El cuerpo humano, por ejemplo, está formado por células nerviosas, células musculares y glóbulos blancos, entre muchas otras clases de células. Aunque comparten algunos aspectos metabólicos, la química interna y las funciones de estos numerosos tipos de células difieren en gran medida. En realidad, gran parte de las diferencias funcionales es consecuencia de la diferencia existente en su química interna.

Uno de los problemas fundamentales para comprender la diferenciación celular es que todos estos tipos de células se originan a partir de una única célula huevo fecundada. Esta célula

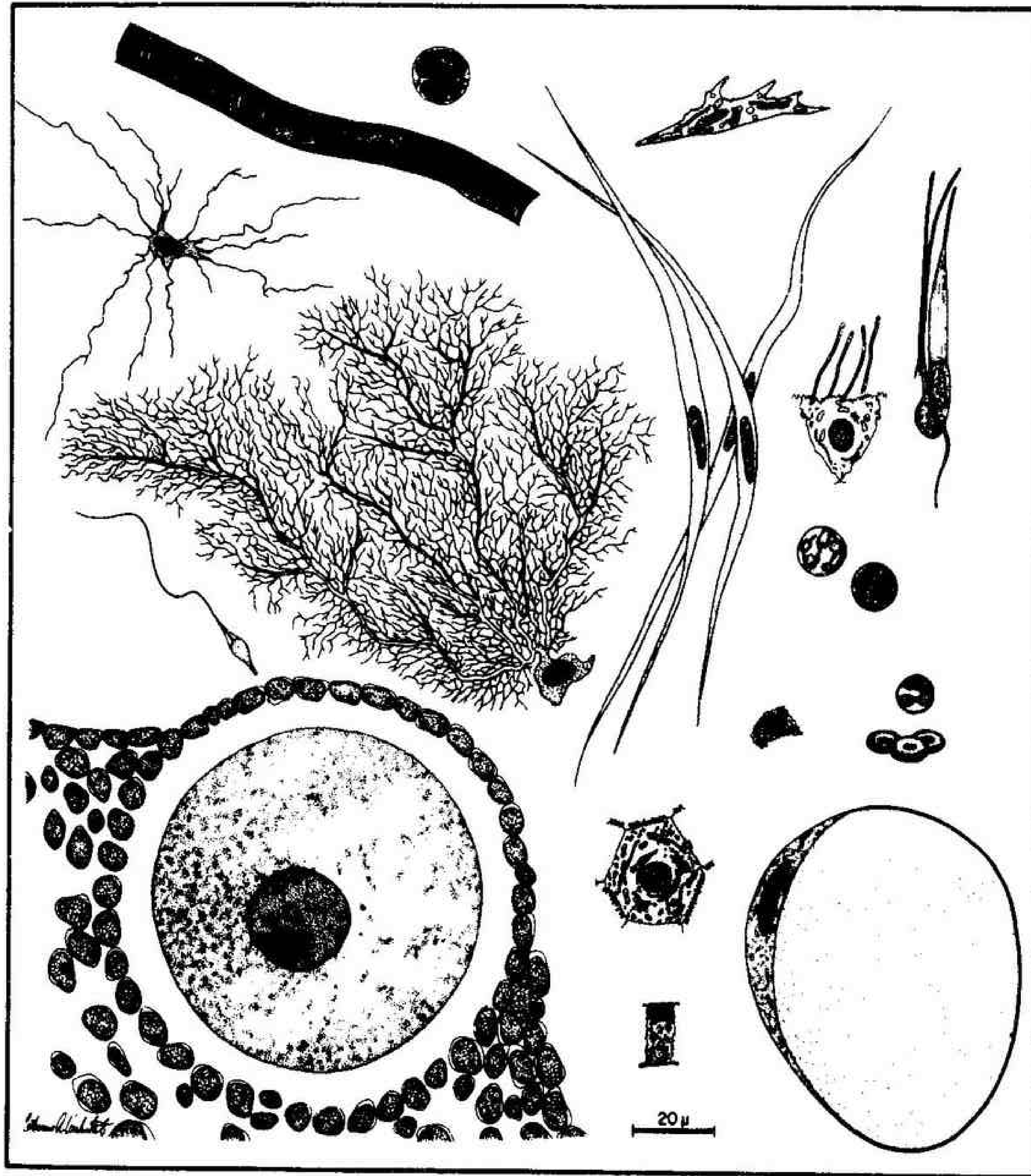


Fig. 14. Tipos de células. Representación a escala de algunos de los tipos de células que se encuentran en el cuerpo humano.

huevo contiene más información de la necesaria para llevar a cabo las funciones químicas de las distintas clases de células del organismo maduro. Además, hay razones para creer que el contenido de ADN de cada una de estas células maduras es idéntico. Cada célula del cuerpo contiene un conjunto completo de

instrucciones acerca de las actividades químicas de todas las demás células del cuerpo. La pregunta que entonces se plantea es la siguiente: ¿Cómo pueden surgir tantos tipos de células, de un mismo origen? ¿Cómo es posible que el total de información contenido en el ADN se restrinja de tal modo que indique a cada tipo de célula que se ciña exactamente a las instrucciones necesarias para sus funciones específicas? En la embriogénesis no existen guías externas al organismo en desarrollo. El proceso está guiado por una combinación entre la información presente en cada célula y la interacción mutua de las células.

Hay pruebas concluyentes de que el influjo de las células vecinas desempeña un papel decisivo en el desarrollo de cada célula. A menudo el proceso de diferenciación tiene lugar en dos fases. La primera reduce las posibilidades de que dispone una célula determinada, pasando desde la amplia gama que se abre ante el cigoto hasta unas cuantas alternativas disponibles para cada célula diferenciada. El segundo paso determina cuál de las alternativas expresará efectivamente la célula. Esto se halla considerablemente influido por los factores ambientales, que en ocasiones dependen de las células vecinas, y en otros casos, de células más lejanas. Aún no se ha dilucidado si este influjo posee un carácter básicamente químico —a través de un intercambio de sustancias—, físico —a través de las presiones ejercidas cuando las células se tocan entre sí— o mixto.

El proceso de desarrollo es en gran medida un esfuerzo realizado en colaboración, mediante el cual la recíproca influencia de los numerosos objetos que forman el sistema puede conducir —en las condiciones adecuadas— a grandes cambios en la conducta global del sistema. En sistemas físicos más sencillos, por ejemplo, un imán o un láser, se conocen fenómenos semejantes. En algunos de estos sistemas físicos se ha podido efectuar una descripción matemática de este proceso de colaboración; quizá se logre hacer lo mismo con respecto a ciertos aspectos de la diferenciación celular.

Mientras tanto, se ha ido avanzando en la comprensión de la diferenciación a nivel de componentes celulares. Incluso en una sola célula individual, interviene una compleja serie de fases. Se cree que la célula es asignada a un estado de diferenciación específica a través de una secuencia de divisiones celulares que reducen paulatinamente sus posibilidades. Una vez que se han producido, la conducta de las diversas células diferenciadas se

rige en gran parte por la manera en que la información existente en el ADN del núcleo se transcribe en el ARN del núcleo, y en que se procesa este ARN antes de que llegue a los ribosomas del citoplasma, donde se traduce en proteínas.

Los complejos detalles estructurales de la cromatina —la combinación de proteínas y ácido nucleico que forma el núcleo celular— desempeñan un papel importante en la transcripción y en el proceso del ARN, pero en la actualidad su influjo exacto sólo se conoce vagamente. Quizá sea necesario descubrir nuevos métodos experimentales para conocer la estructura de la cromatina. Es probable que el avance en los aspectos moleculares de la diferenciación celular continúe con rapidez, ya que los biólogos han podido contestar ya a preguntas semejantes acerca de la conducta de organismos más simples.

La morfogénesis

El óvulo fecundado es un objeto aproximadamente esférico, con una complicada estructura interna. A través de una serie de divisiones celulares, produce gran cantidad de células más pequeñas, que al principio se disponen de manera muy sencilla. Poco después, sin embargo, estas células —moviéndose y creciendo de manera asimétrica— se reestructuran en un complicado patrón de formas, y comienzan a adquirir el aspecto del organismo adulto. Además, las formas de las células individuales se convierten en la amplia variedad característica de los organismos adultos, y que aparece en la figura 14.

Este proceso, que se conoce por el nombre de morfogénesis, continúa siendo un problema de importancia para la ciencia. En la comprensión de la morfogénesis, en realidad, existen varios problemas distintos. El que los científicos conocen mejor es el problema referente a cuáles son los mecanismos que emplean las células individuales para moverse y para cambiar de forma. Mediante el microscopio electrónico se han descubierto en las células dos clases de estructuras filamentosas: los microfilamentos y los microtúbulos (fig. 15). Estas estructuras, compuestas principalmente de proteínas, están adheridas a la superficie celular y a otras estructuras en el interior de la célula. Están en condiciones de ejercer fuerzas que alteren la forma de la célula, provocando movimientos o cambios permanentes de forma.

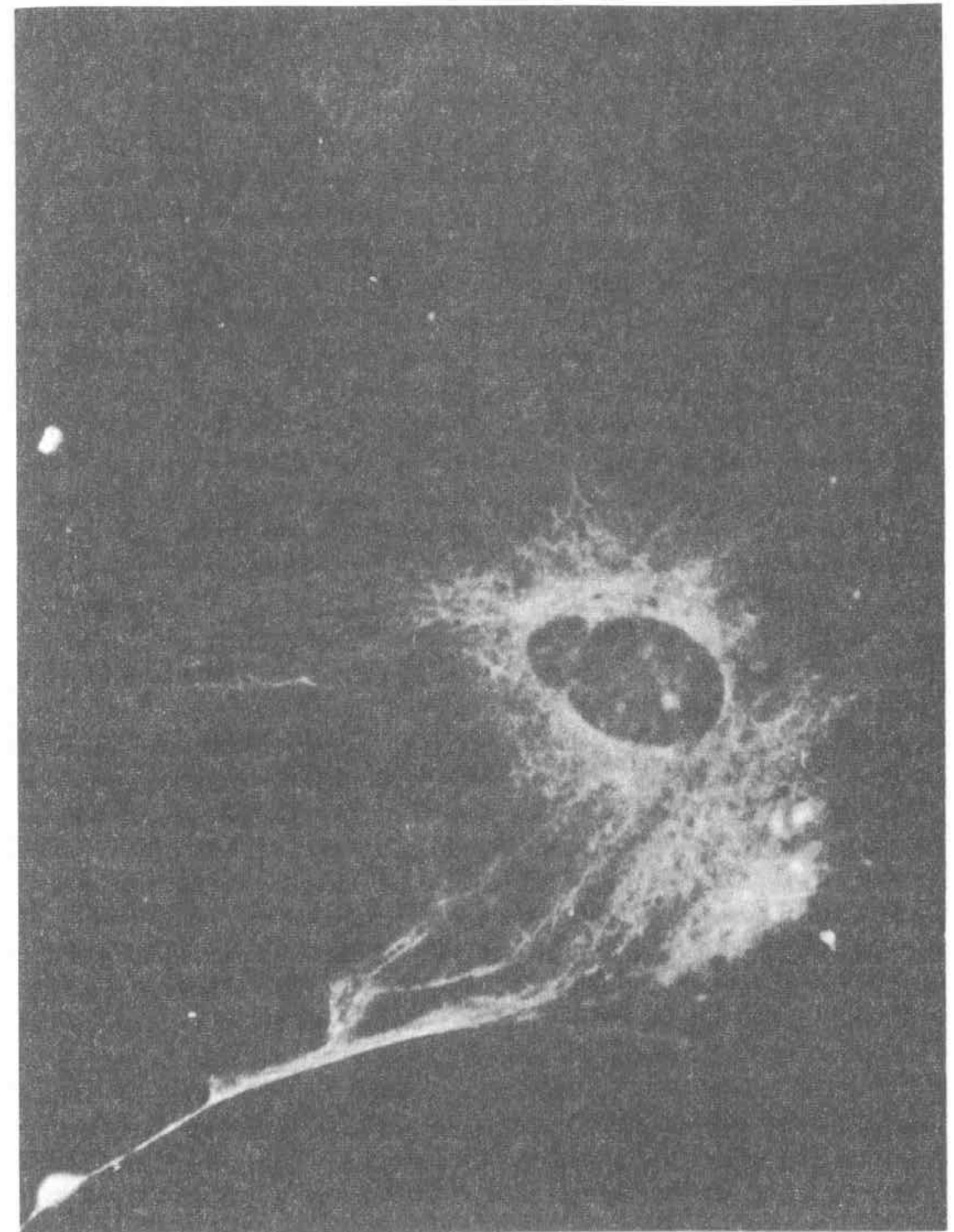


Fig. 15. Microtúbulos. La célula de embrión de ratón que se ve en esta imagen ha sido coloreada de forma que permita visualizar el patrón filamentoso de los microtúbulos.

Otro problema es el de cómo se realiza la interacción de la forma de la célula y de sus componentes con los acontecimientos químicos de la diferenciación celular. En otras palabras: ¿cómo influye el cambio de la bioquímica celular en las acciones de los componentes de la célula —por ejemplo, los microtúbulos— con objeto de provocar cambios de forma? También se da el problema inverso: cómo influyen los cambios de forma en el material genético de la célula, para modificar su bioquímica. Hay motivos para pensar que la interacción entre bioquímica y forma física tiene un carácter recíproco.

A un nivel superior de organización, se plantea el problema de cómo —y bajo qué influjo— los grupos de células se estructuran por sí mismos en los patrones que forman un tejido organizado. Y desearíamos saber cuáles son la naturaleza y los mecanismos del influjo de los tejidos sobre las formas y los comportamientos químicos de las células que contienen. Las lagunas más serias de nuestra comprensión acerca del desarrollo inicial se dan a este nivel. Una pregunta abierta de gran importancia es la que se plantea si la información relativa a este tipo de organización se halla codificada dentro de los genes de cada organismo, o si este nivel de organización es consecuencia de algún tipo de «automontaje», término con el que denomino una interacción mutua de células, después de haber alcanzado cierto estadio de desarrollo, y que no depende demasiado de la sofisticada bioquímica celular. Puede ocurrir que gran cantidad de células de un tipo específico asuman por sí mismas automáticamente un patrón definido, sin necesidad de recibir instrucciones al respecto desde un programa interno.

Existen argumentos a favor y en contra de dicha autoorganización. Algunas observaciones referentes al desarrollo son coherentes con la noción según la cual lo que le ocurra a las células en determinada parte del organismo en desarrollo depende primordialmente de la influencia mutua de las células vecinas. Por ejemplo, en ciertas fases de la embriogénesis pueden extraerse células de una parte del embrión, donde normalmente se convertirían en parte del sistema nervioso, y trasplantarse a otra zona. Las células trasplantadas continuarán desarrollándose hasta convertirse en tejido de un tipo completamente distinto. Por otra parte, aún no se ha establecido con claridad cómo la autoorganización puede resultar lo bastante específica como para que un óvulo fecundado de ratón siempre se convierta en un ratón, y el de abeja siempre se convierta en una abeja. Esto nos indica que la especificidad genética desempeña un papel importante incluso en los niveles superiores de organización, pero deja abierto el interrogante sobre cuál es la importancia que tiene la autoorganización para la morfogénesis.

Hay muchas otras preguntas que hacen referencia al desarrollo en niveles de organización aún más elevados. No comprendemos la mayoría de los pasos que sirven para organizar las células en tejidos, los tejidos en órganos, y los órganos en un organismo que funcione. No sabemos si existe un único camino para que tenga lugar la embriogénesis, o si existen senderos alternativos para llegar a un organismo adulto de un tipo específico. Aunque se han efectuado progresos sustanciales, siguen existiendo problemas de envergadura. La comprensión de la embriogénesis es una de las tareas primordiales de la ciencia.

ENVEJECER: EL FINAL DEL DESARROLLO

Cuando un organismo llega al final de su crecimiento, permanece en una aparente llanura durante largo tiempo, cambiando muy poco en sus funciones externas. Sin embargo, incluso en esta fase de madurez se producen lentos cambios. Aparece un deterioro gradual en el funcionamiento biológico del organismo, tanto a nivel de comportamiento explícito como a nivel de bioquímica básica. En los seres humanos y en otros mamíferos, este proceso de deterioro es lo que llamamos envejecimiento. Tal proceso acaba con la muerte del organismo, que es a veces consecuencia de la incapacidad para responder a un desafío externo, y a veces se debe a un acontecimiento interno provocado por el deterioro de una función biológica.

No es cierto que el envejecimiento sea un fenómeno universal en los organismos complejos; sólo puede darse en aquellos que poseen una limitación interna del tamaño hasta el que pueden crecer. Sin embargo, también hay indicios de que incluso en los organismos unicelulares existe algo parecido a la vejez. En cualquier caso, el envejecimiento es un fenómeno muy extendido en la naturaleza, y a los científicos les gustaría comprenderlo. Tal comprensión tendría considerables consecuencias para la vida humana, si nos permitiese influir sobre el modo de envejecer.

Por desgracia, nuestra comprensión actual del envejecimiento es aún más rudimentaria que nuestra comprensión del desarrollo inicial. No conocemos las causas del envejecimiento, y en la mayoría de los casos tampoco sus mecanismos. No sabemos si el envejecimiento es algo intrínseco al desarrollo, o una aberración de éste. No sabemos si el proceso básico del envejecimiento se produce a nivel celular, a nivel de todo el organismo, o en algún nivel intermedio. Se han sugerido todas estas posibilidades, pero ninguna de ellas ha resultado ser lo bastante convincente. Existen muchas teorías acerca del envejecimiento, pero ninguna ha sido capaz de sintetizar de manera definitiva los hechos existentes.

Los científicos saben mucho sobre la tasa de mortalidad y la correspondiente esperanza de vida de muchos organismos. La tasa de mortalidad y el ciclo vital varían mucho entre las distintas especies. Además, en los seres humanos y en la mayoría de los demás organismos complejos, la tasa de mortalidad aumenta con rapidez al mismo tiempo que la edad cronológica. En los seres humanos que tengan más de 30 años, la tasa de mortalidad se eleva al doble cada siete años. En otras especies, con un ciclo vital más breve, se dobla cada menos tiempo. Debido al rápido aumento de la tasa de mortalidad junto con la edad, cada especie posee un ciclo vital muy bien definido. La mayoría de los organismos que mueren por enfermedad —y no por accidente— viven hasta una edad que no es muy distinta del ciclo vital medio en su especie. Por ejemplo, alrededor del 70 % de los norteamericanos que murieron en 1981 fallecieron dentro de un lapso superior o inferior en 15 años a su esperanza media de vida, cifrada en 74 años. Por el contrario, la mayoría de los ratones de laboratorio mueren aproximadamente con la edad correspondiente a la esperanza de vida media de su especie: dos años. Una teoría satisfactoria sobre el envejecimiento debe explicar hechos importantes: que la mayoría de los individuos de una especie vivan el mismo tiempo, y que este tiempo varíe tanto entre las diversas especies.

Poseemos datos convincentes de que el funcionamiento fisiológico decae lentamente, a un ritmo que depende de cada especie. En los seres humanos el valor de muchas funciones mensurables —por ejemplo, la capacidad pulmonar— disminuye a la mitad en un lapso de 50 años (fig. 16). Los datos empíricos indican que todos los órganos declinan funcionalmente a un ritmo parecido, pero que el funcionamiento de los órganos no cambia con tanta celeridad con la edad como la tasa de mortalidad.

Hay datos contradictorios con respecto a los cambios funcionales de las células individuales a lo largo de la esperanza de vida del organismo. Algunos aspectos del metabolismo celular parecen cambiar de manera considerable a medida que el organismo envejece, mientras que otros apenas se alteran. No existe una propiedad celular cuyo cambio a lo largo del tiempo sea utilizada por todos como medida específica del envejecimiento en los organismos vivientes.

En ciertos casos ha sido posible mantener con vida células —y a veces tejidos completos— más allá del ciclo vital normal

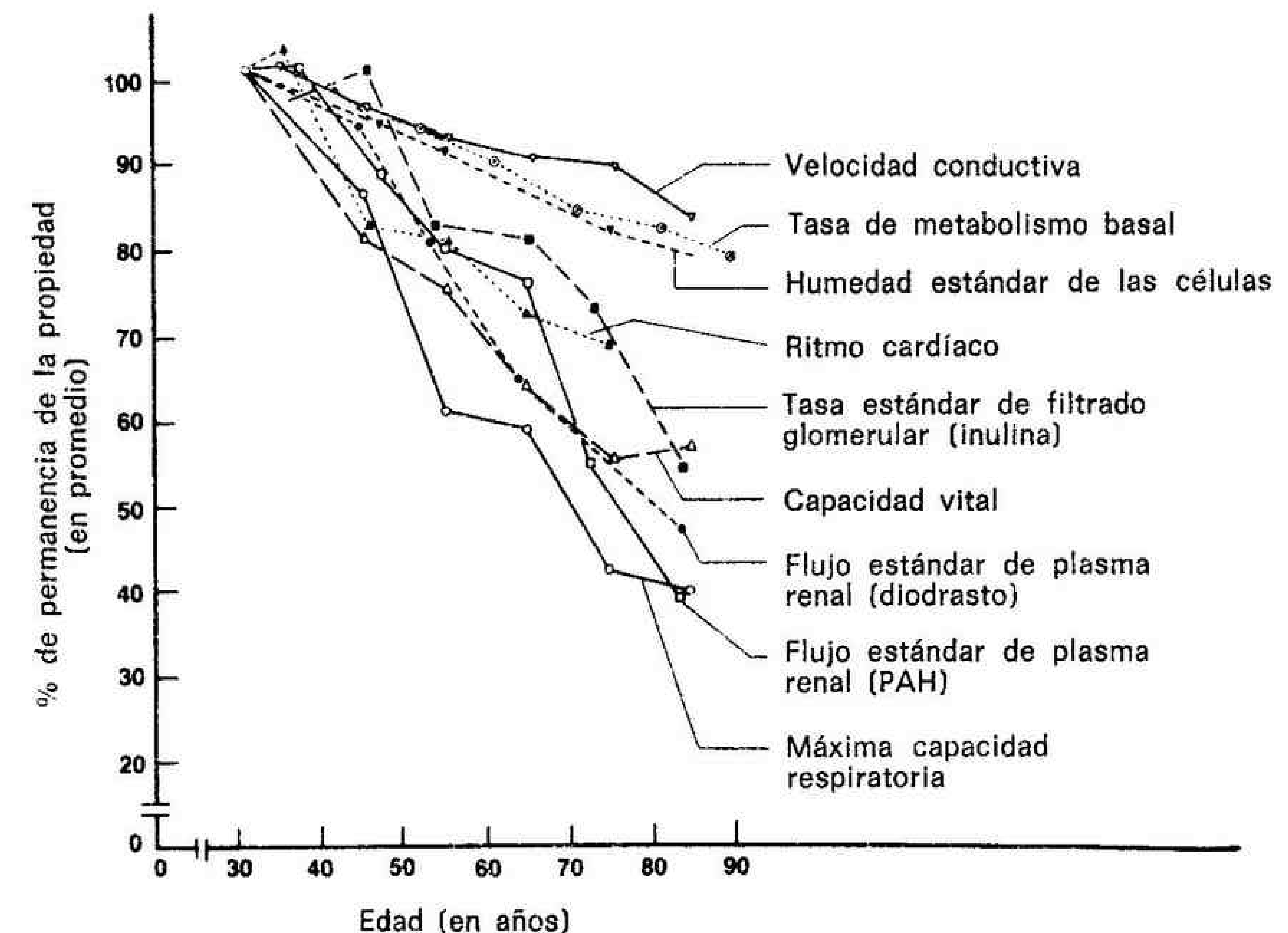


Fig. 16. El cambio de funciones con la edad. Vemos aquí la manera en que disminuyen con la edad diversas funciones fisiológicas.

del organismo individual. Una forma de conseguirlo consiste en bajar la temperatura del entorno celular hasta un punto en que se detenga efectivamente el metabolismo. Las células pueden descongelarse, y en muchos casos continúan viviendo después como si el tiempo no hubiese pasado durante su sueño congelado. Sin embargo, esto sirve como forma de conservar células, y no de ampliar su ciclo vital. Otra cosa que se ha hecho es injertar tejido de un organismo viejo —por ejemplo, tejido mamario de ratón— en un organismo más joven. En ciertos casos esto se ha realizado de manera secuencial en varias ocasiones, de manera que el tejido original sobrevivió varios ciclos vitales. No obstante, este procedimiento acaba por perder su eficacia. No se sabe con seguridad si ello se debe a un proceso de envejecimiento que se produzca en el tejido trasplantado, o al trauma causado por el proceso de injerto. Tampoco se ha podido demostrar si *todos* los tejidos orgánicos tienen un ciclo vital potencial que sea mucho mayor que el de los organismos individuales a los que pertenecen, porque sólo se pueden trasplantar de este modo unos cuantos tipos de tejido. Es evidente que se requieren muchos más experimentos en esta dirección para discriminar entre el envejecimiento celular y el envejecimiento del organismo.

Otro enfoque experimental que está empezando a hacerse posible en los mamíferos implica el trasplante de partes de células —el núcleo, por ejemplo— desde un organismo envejecido hasta una célula tomada de un organismo joven. Un estudio acerca del funcionamiento de estos híbridos —comparándolos con otros híbridos semejantes producidos mediante la transferencia de núcleos desde organismos más jóvenes— nos brindaría informaciones acerca del envejecimiento a nivel de componentes celulares, y también nos podría indicar si el envejecimiento implica determinados cambios en el material hereditario. También cabe plantear esta última pregunta determinando la secuencia de las bases existentes en los ácidos nucleicos obtenidos en organismos envejecidos, y comparando tal secuencia con la obtenida en el mismo organismo cuando era joven. Esto puede practicarse tanto con el ADN del núcleo como con los ARN de los ribosomas que intervienen en la síntesis de proteínas, para comprobar dónde se encuentra el influjo del envejecimiento sobre el metabolismo celular básico, si es que se produce en algún lugar.

¿Envejecimiento en probeta?

Otra fuente de información sobre el envejecimiento procede de los cultivos celulares que se desarrollan en medios artificiales. Estos medios son una combinación de aquellas sustancias químicas necesarias para la vida. Se hacen crecer células originarias de un tejido normal en un recipiente de plástico, y a continuación se subcultivan, es decir, se extrae una pequeña cantidad y se transfiere a otros recipientes una y otra vez, para evitar la superpoblación. L. Hayflick y sus colaboradores realizaron un importante descubrimiento: cuando las células normales crecen de este modo, se reduce su capacidad potencial de división.

Se ha descubierto que las células pueden seguir dos caminos distintos. Si se examinan con cuidado para eliminar aquellas que manifiestan cambios cromosómicos, después de una cantidad limitada de divisiones —por término medio, unas cincuenta, en el caso de células procedentes de embriones humanos— las células entran en un estado en el cual ya no pueden ser inducidas a dividirse. Esta alteración no está relacionada con el transcurso del tiempo. Si se seleccionan las células después de una cantidad reducida de divisiones, se conservan a baja temperatura o se evita que se dividan durante cierto tiempo, empleando algún otro método, y a continuación se les permite que reanuden su división, continuarán experimentando la misma cantidad total de divisiones.

Existen ciertos datos que nos indican que el máximo de divisiones por las que pueden pasar las células normales varía sistemáticamente entre las distintas especies, de manera correlativa con el ciclo vital normal de la especie. También hay pruebas de que las células procedentes de adultos tienen un potencial de ulterior división más reducido que el de las células de embrión, y de que la cantidad de divisiones restantes disminuye con la edad. La comparación entre células cercanas a la fase en que ya no se pueden dividir (o que ya la han superado), y células que todavía pueden dividirse, nos muestra ciertas diferencias en sus funciones bioquímicas, por ejemplo, en la tasa de producción de determinados enzimas. Sin embargo, en tales estudios no ha aparecido nada que explique con claridad la diferencia de potencial reproductor causada por esas diferencias bioquímicas.

El otro camino que pueden seguir las células cultivadas consiste en someterse a alguna alteración cromosómica, que las

convierta en una forma de célula cancerosa. Estas células transformadas pueden crecer y dividirse indefinidamente. A veces se las califica de inmortales, aunque en sentido estricto lo que merece dicha denominación es la línea celular —es decir, una célula y sus descendientes— y no las células individuales. Una línea de células procedentes de Helen Lane, enferma de cáncer fallecida en la década de 1940, continúa existiendo en innumerables laboratorios de todo el mundo. Es probable que las células sigan viviendo mientras los científicos continúen suministrándoles nutrientes (fig. 17). Como es evidente, mediante transformaciones cromosómicas, las células pueden escapar del limitado potencial de crecimiento de las células normales. Hay ciertos datos que indican claramente que la simple sustitución de un gen es la responsable de este cambio de células mortales en inmortales.

Hay otros rasgos del cultivo celular que también son de interés. Uno de ellos es que —en la mayoría de los casos— no puede lograrse que las células crezcan en un medio puramente artificial. Para conseguir que crezcan las células no transformadas es necesario añadir suero procedente de organismos vivos. En el pasado se formuló la hipótesis según la cual el cese del crecimiento normal se debía al agotamiento de un factor vital presente en el suero. Sin embargo, esto quedó desmentido por el hecho de que el mismo medio puede contener al mismo tiempo células viejas al final de su ciclo de división, y células jóvenes que siguen dividiéndose. Por otro lado, si al medio de cultivo se añaden determinadas sustancias —por ejemplo, cortisona— es posible aumentar alrededor de un 25 % la cantidad total de divisiones que se producen en las células normales. La cortisona es un tipo de hormona conocido por formar conjuntos que penetran en el núcleo celular e influyen sobre la manera en que el ADN se transfiere al ARN; ésta es la propiedad que puede afectar de manera tan radical el potencial de división.

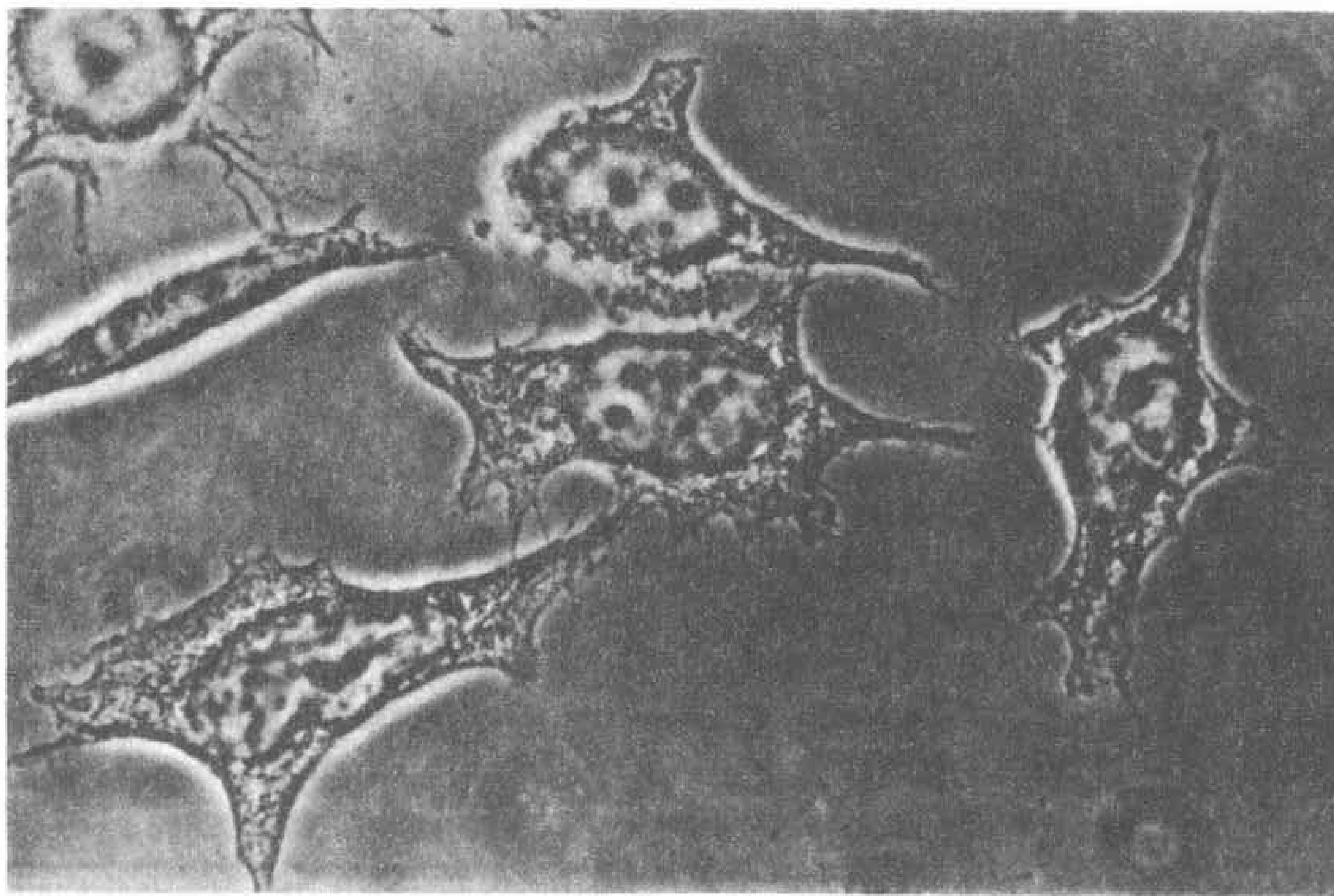


Fig. 17. Células He La. Descendientes de células extraídas originariamente de un tumor canceroso en un paciente humano. Al parecer, estas células pueden dividirse y crecer indefinidamente, a diferencia de lo que ocurre con las células normales.

La mayoría de las células de los organismos vivientes no pasan, a lo largo del ciclo vital del organismo, por la cantidad de divisiones que pueden inducirse en un cultivo celular. Además, las condiciones en que las células se ven obligadas a crecer en el laboratorio son muy distintas de las condiciones normales. Quizá no resulte sorprendente que, en dichas condiciones artificiales, las células acaben por dejar de dividirse, o por transformarse en un estado nuevo en el que se da una división ilimitada.

No se sabe muy bien cuál es el destino de las células que dejan de dividirse. Algunos experimentos han mostrado que tales células pueden mantenerse indefinidamente en un estado en el que continúan teniendo una actividad metabólica. Esto nos indica que la pérdida de potencial divisivo no equivale necesariamente a la senilidad. En realidad, se ha sugerido la hipótesis de que las células de cultivo que no se ven afectadas por un cambio cromosómico sufren otro tipo de diferenciación a partir de sus células de origen, mediante la cual pierden su capacidad de división, de una forma parecida a lo que ocurre con las células musculares y nerviosas de los organismos vivos.

La pérdida de potencial de división en los cultivos celulares puede considerarse con toda razón como un importante elemento de información para el estudio del envejecimiento, pero no constituye la clave decisiva para comprender este fenómeno.

Las teorías del envejecimiento

Por escasa que sea la información empírica de que dispongamos acerca del envejecimiento, existen innumerables explicaciones al respecto. Aunque no son demasiado numerosos los científicos que trabajan en esta materia, a menudo da la sensación de que cada científico que investiga sobre el envejecimiento se considera obligado a proporcionar su propia teoría, lo cual es un patrón investigador más característico de la filosofía especulativa que de la ciencia. No se sabe con certeza si alguna de las teorías que se han propuesto va por el buen camino. A pesar de todo, podemos clasificar las distintas teorías del envejecimiento que se han propuesto, y comprobar qué tipo de experimentos o de análisis ulterior nos sugieren.

Las teorías sobre esta cuestión deben plantearse dos preguntas fundamentales. Una de ellas es la causa del envejecimiento: ¿qué es lo que hay en los organismos complejos o en su entorno que les lleva a envejecer? La otra se refiere a los mecanismos del envejecimiento: ¿cuáles son los cambios fundamentales que tienen lugar en los organismos a medida que envejecen? Se trata de preguntas vinculadas entre sí pero distintas desde un punto de vista lógico. Existen muchas causas posibles del envejecimiento que funcionan a través de unos mismos mecanismos. Por ejemplo, tanto el envejecimiento causado internamente como el inducido por el entorno actúan de manera primordial dañando una parte específica del organismo, por ejemplo, el sistema inmunitario, y este daño acaba provocando todos los demás efectos del envejecimiento. A la inversa, una causa específica del envejecimiento podría mostrarse a través de muchos mecanismos distintos, tales como dañar un tipo específico de célula o provocar una pérdida funcional en todos los diferentes tipos de célula.

Puesto que la mayoría de los aspectos de la vida de los organismos complejos son consecuencia de un prolongado proceso evolutivo, es lógico preguntarse si el proceso de envejecer realiza alguna función evolutiva. El biólogo británico Peter Medawar señala que el envejecimiento ha aparecido con objeto de garantizar la efectividad reproductiva. Según su perspectiva, ciertos genes cuyas acciones podrían ser de efectos nocivos —e incluso letales— para el organismo, pueden actuar a diversas edades en diferentes miembros de una especie. Si el gen actúa

en una época temprana de la vida, es probable que el organismo en cuestión no tenga demasiados descendientes. En consecuencia, si el tiempo de actividad del gen es en sí mismo una característica heredada, la selección natural tendería a seleccionar aquellos organismos en los cuales se produce en una época tardía la actividad del gen «peligroso», cuando los organismos ya se han reproducido.

Entonces ¿por qué estos genes no quedan eliminados por completo a través de la selección natural? Medawar contesta que hay que estudiar la población de los organismos existentes en condiciones naturales. Incluso en ausencia de genes letales, en dicha población habría muertes no relacionadas con la vejez, provocadas por accidentes, fieras, etc. En consecuencia, la población tendría escasos miembros cronológicamente viejos. Esta consecuencia por sí sola haría que la mayoría de los organismos en condiciones de reproducirse fuesen relativamente jóvenes. Como la selección natural sólo puede actuar sobre organismos que se reproducen, habría una tendencia escasa —o nula— a eliminar aquellos genes nocivos que sólo actúan en épocas tardías de la vida. El análisis de Medawar implica que la vitalidad de los organismos debe comenzar a disminuir a través de la actividad de genes nocivos a aquella edad aproximadamente en que —en circunstancias naturales— los accidentes y las demás causas de muerte no relacionadas con la edad habrían destruido de todas formas la mayoría de los organismos.

Por lo tanto, según Medawar el proceso de envejecimiento es el resultado de unos genes cuya acción ha sido aplazada hasta más allá de la edad promedio de reproducción, a través de la selección natural. Su análisis supone que los factores ambientales negativos —que llevan a la muerte incluso en ausencia del envejecimiento— son elementos importantes para establecer el ciclo vital de algunas especies. Esto nos indica que aquellas especies menos sometidas a los depredadores, y con un suministro de alimentos mejor asegurado, manifestarían una tendencia a poseer un ciclo vital innato de mayor duración.

La teoría de Medawar sobre el origen del envejecimiento deja sin responder varias preguntas. Su argumentación no sugiere un mecanismo específico de envejecimiento. Además, la acción de genes nocivos individuales no parece provocar el lento descenso de vitalidad que caracteriza el envejecimiento normal. Por otro lado, el momento en que comienza a actuar el gen pre-

sumiblemente forma parte del desarrollo, y el modelo de Medawar no establece con claridad qué es lo que determina la escala temporal de la acción de los genes nocivos, señalando así el ciclo vital de cada especie.

A pesar de todo, probablemente la teoría de Medawar explica en parte por qué sigue existiendo el envejecimiento a pesar de la selección natural. Sugiere que los animales criados en condiciones de laboratorio durante muchas generaciones podrían aumentar su ciclo vital, dado que las condiciones ambientales que determinaron su ciclo originario ya no están vigentes. Asimismo, sugiere la existencia de una correlación entre la duración del período reproductivo de una especie y su ciclo vital, correlación que parece existir en la práctica. Esta perspectiva del envejecimiento resultaría más creíble si pudiésemos identificar los componentes genéticos que no han estado sometidos a la selección natural. Esto podría suministrarnos un mecanismo acorde con la causa de envejecimiento que se sugiere.

Para explicar el envejecimiento se han propuesto diversos mecanismos que actúan a diferentes niveles de organización. En una clase de teorías, los acontecimientos primarios tienen lugar a nivel celular o subcelular, y afectan a una extensa población de células de todos los tipos. Estos acontecimientos celulares influyen naturalmente en el funcionamiento de los órganos del cuerpo, y llevan a los característicos cambios relacionados con la edad que se observan en tales órganos, pero estos cambios son secundarios con respecto a los cambios de las células mismas. En otra clase de teorías, se considera que los acontecimientos primarios ocurren a nivel de órganos o sistemas de órganos específicos. Estos cambios influyen sobre otros órganos sólo de manera indirecta, pero, debido a la interdependencia de los sistemas de órganos corporales, acaban por manifestar efectos nocivos en todas partes.

Los organismos complejos son sistemas muy integrados, y por lo tanto no es fácil determinar en qué parte del cuerpo o a qué nivel de organización ocurren los acontecimientos primarios del envejecimiento. Por ejemplo, supongamos que hay un cambio bioquímico dentro de las células del hígado, que modifica la forma en que éstas metabolizan la proteína. Puesto que los productos del metabolismo del hígado circulan en la sangre, pronto podrían afectar el funcionamiento del cerebro, a nivel celular y a nivel del órgano en su integridad. La vulnerabilidad provocada

por esta interdependencia sistémica es el precio que tienen que pagar los organismos complejos para poder funcionar.

¿Cómo afrontar las dificultades que esta interdependencia plantea al estudio del envejecimiento? Si pudiésemos supervisar de manera continuada el funcionamiento de diversos tipos de células y de órganos durante la vida de un organismo, quizá descubriésemos que los cambios de los sistemas orgánicos que están asociados con el envejecimiento siempre tienen lugar en un orden preciso. O también es posible que haya siempre dentro de la célula un cambio específico —bioquímico o físico— que preceda a los demás cambios vinculados con el envejecimiento. Tal información nos sugiere mecanismos específicos de envejecimiento. En la actualidad no estamos en condiciones de supervisar de manera continua dichos cambios intracorporales sin influir decisivamente sobre los propios cambios. Lo que se hace, en cambio, es efectuar una disección de los animales que han muerto a diversas edades cronológicas, y comparar sus células y sus sistemas orgánicos. Este procedimiento no es lo suficientemente preciso como para obtener los datos requeridos. Sin embargo, quizá pronto se logre conseguir tales datos introduciendo microsensores en el cuerpo, que podrían permanecer implantados durante largos períodos de tiempo, y que podrían ser lo bastante pequeños para no perturbar a la célula.

En sentido estricto, hay que distinguir entre mecanismos de envejecimiento celulares y subcelulares. Las células eucarióticas son sistemas complejos, que contienen muchos componentes distintos que interactúan entre sí. La complejidad de las células eucarióticas es tan elevada que, aunque el envejecimiento fuese en esencia un fenómeno celular, sería probable que se produjese de manera diferente entre los distintos componentes celulares. Si esto es así, surgen nuevas preguntas. Una de ellas es el problema de determinar cuáles son los componentes celulares que cambian durante el proceso de envejecimiento. Por ejemplo, durante la diferenciación celular que tiene lugar a lo largo de la embriogénesis, la secuencia de ADN de las células cambia muy poco. ¿Sucede lo mismo durante el proceso de envejecimiento en el cuerpo? ¿Sucede durante el «proceso de diferenciación» que ocurre a lo largo de los cultivos celulares?

Algunas de las técnicas de biología molecular que han sido aplicadas con anterioridad a los cambios subcelulares durante la embriogénesis nos están proporcionando algunos datos al res-

pecto. Se ha descubierto que, tanto en el proceso de envejecimiento que se da en el cuerpo viviente como en el proceso que ocurre en el cultivo de células normales, determinadas secuencias de ácido nucleico son eliminadas de la serie del ADN, mientras que otras se amplían en su interior. El ADN de las células envejecidas es diferente al de las células más jóvenes. ¿Acaso estos cambios en el ácido nucleico constituyen un mecanismo esencial para el envejecimiento? Aún no estamos seguros de ello, pero esta información es el primer paso para contestar dicha pregunta.

El interrogante se complica aún más por el hecho de que cada componente de una célula eucariótica influye sobre todos los demás. Al igual que con respecto a los cambios vinculados a la edad que tienen lugar en los niveles superiores de organización, se plantea el problema de determinar qué cambios en los componentes celulares son primarios con respecto a los cambios en los demás componentes celulares, y cuáles son secundarios. Existen métodos de investigación que permiten llevarlo a cabo. Por ejemplo, los componentes celulares se pueden trasplantar a otras células, método que nos ayudará a determinar qué cambios en los componentes celulares están relacionados con el envejecimiento, y cuáles son consecuencia de existir en diversos entornos celulares. A continuación nos hallaremos en una mejor situación para determinar hasta qué punto el envejecimiento constituye una manifestación de tales cambios. En último término, este tipo de información sobre el envejecimiento a distintos niveles de organización debería permitirnos descubrir si existe un nivel primario en el que tenga lugar el envejecimiento.

Otro aspecto de las teorías acerca de este proceso hace referencia a la distinción entre envejecimiento celular y de nivel superior. Ello se relaciona con la posible consideración del envejecimiento como parte del proceso normal de desarrollo, o como resultado de un daño que ocurre a lo largo de la vida normal, y que en la actualidad no podemos evitar. Las teorías que asumen la primera postura reciben el nombre de teorías «programadas», mientras que las partidarias de la segunda son las del «desgaste». Nos es posible sin duda imaginarnos que el envejecimiento es un fenómeno programado para funcionar en todas las células, o en las células de un sistema orgánico específico. También es posible imaginarse que todos los tipos de células se

gastan de igual manera a lo largo de la vida, o que el desgaste se concentra en unos cuantos tipos esenciales, cuyo disfuncionamiento acaba por dañar las células más resistentes.

Las teorías según las cuales el envejecimiento está programado sugieren la intervención de mecanismos semejantes a los que funcionan en otras fases de desarrollo, por ejemplo, en la diferenciación celular. Esto sugiere que un avance en la comprensión de uno de estos mecanismos ayudará a comprender el otro. Sin embargo, como el envejecimiento tiene lugar a una escala temporal mucho más extensa que la embriogénesis, quizás estén involucrados otros mecanismos fundamentales.

Las teorías del desgaste suponen que el envejecimiento implica mecanismos no vinculados con los del desarrollo inicial, y que la causa de aquél puede estar constituida por un factor relativamente simple. Tales teorías pueden subdividirse en dos grupos: las que atribuyen el agente causante del daño a algo que está presente en el medio ambiente habitado por el organismo, y las que suponen que el daño ha sido producido por algo perteneciente al proceso vital mismo, con relativa independencia del entorno. El químico británico Leslie Orgel ha propuesto una valiosa teoría del envejecimiento, que pertenece a la segunda subdivisión. Orgel sostiene que el mecanismo básico del envejecimiento es una acumulación de errores en el metabolismo celular, que se origina en el proceso de síntesis proteínica dentro de la célula. Cuando se produce por accidente una proteína enzimática deficiente, la actividad de esta proteína causará una pequeña perturbación en la función celular, sobre todo si la proteína misma interviene en nuevas síntesis proteínicas. Estas perturbaciones llevan a la producción de más proteínas deficientes, lo cual a su vez provoca nuevas perturbaciones. Continúa la acumulación de errores dentro de la célula, cosa que acaba provocando una pérdida funcional. En consecuencia, el envejecimiento se identifica con esta pérdida funcional en todo el organismo.

Existen ciertas pruebas de que los «errores» proteínicos se acumulan con la edad en algunas células, pero los datos no son uniformes. Tampoco está claro que tal acumulación sea consecuencia del mecanismo propuesto por Orgel. Además, no existe ningún argumento convincente que sirva para vincular la supuesta pérdida de función celular con los hechos conocidos sobre el envejecimiento del organismo, aunque quizás esto sea es-

perar demasiado en esta fase. Sea como fuere, la teoría del «error» de Orgel es fascinante. Aunque el mecanismo que propone no sea la causa del envejecimiento, vale la pena investigar la cuestión porque puede ser reveladora acerca de los procesos de error y de reparación de moléculas en las células. Una variante de las teorías del desgaste sostiene que el envejecimiento se produce porque los mecanismos de reparación de las células que trabajan de manera continua para reparar los errores que se producen en el ácido nucleico y en las proteínas pierden efectividad en determinada etapa de la vida del organismo. Si ocurre tal cosa, podría ser consecuencia de los «genes nocivos» que postulaba el razonamiento de Medawar. Tampoco en este caso se ha descubierto una demostración definitiva de este efecto.

En el momento actual no existe una teoría uniformemente satisfactoria acerca del envejecimiento. Ninguno de los mecanismos de envejecimiento que se han sugerido hasta ahora explica de modo satisfactorio ni siquiera los relativamente escasos hechos que se conocen, y mucho menos predice nuevas consecuencias que puedan verificarse en un momento posterior. No se sabe cuál es la mejor forma de interpretar el fenómeno. Probablemente lo más necesario en este momento no sea tanto una teoría correcta acerca del envejecimiento, sino una estrategia razonable de investigación, que nos permita obtener más información pertinente, sobre la cual basar una teoría correcta. Creo que un elemento esencial de dicha estrategia de investigación sería el estudio de las células y de los componentes celulares fuera de sus entornos normales. Tales estudios nos permitirían separar los efectos del envejecimiento que son intrínsecos a estos elementos individuales, de aquellos que han sido inducidos en éstos por el hecho de formar parte de un sistema integrado. También deben permitirnos distinguir entre los efectos ambientales y los que se originan en el proceso vital mismo. Esta información posibilitará la formulación de teorías del envejecimiento que se encuentren mejor basadas en una observación empírica. Confiemos en que tales teorías darán pie a la comprensión de lo que actualmente representa uno de los enigmas más desconcertantes de la vida.

Todos los temas que he calificado de rompecabezas para la biología contemporánea exigen la comprensión de una compleja secuencia de acontecimientos, en la que intervienen numerosos procesos que avanzan al mismo tiempo y que casi con toda seguridad contienen complicados circuitos de retroalimentación. Pienso que constituye una predicción plausible el considerar que la biología futura —y en realidad, toda la ciencia del futuro— necesitará desarrollar formas de pensar acerca de procesos generales de este tipo. Aún no sabemos si existen rasgos universales que describan todos los procesos complejos y paralelos de esta clase, pero no sería nada raro que existiesen. Su descubrimiento constituirá un importante avance científico, comparable al descubrimiento de que las mismas leyes sirven para describir todos los tipos de movimiento. Una adecuada aproximación a esta pregunta puede surgir gracias a la experiencia que estamos obteniendo en el diseño de programas informáticos, que comparten numerosos rasgos de estos procesos, pero que poseen la ventaja de ser un resultado de nuestro propio diseño, y por lo tanto, están bajo nuestro control experimental en mayor medida que los procesos naturales.

5. MÁS ALLÁ DEL MICROSCOPIO Y DEL TELESCOPIO: NUEVAS HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES Y NUEVOS DESCUBRIMIENTOS

En la ciencia ha habido descubrimientos como, por ejemplo, los rayos X en 1895, que no eran una ampliación directa de lo que entonces se conocía. Con frecuencia, estos nuevos descubrimientos —que pueden provocar grandes transformaciones en la ciencia— se hacen posibles gracias a los nuevos métodos experimentales o de observación. Dos ejemplos de ello son la aparición del telescopio en astronomía y la del microscopio en biología, hechos ambos que tuvieron lugar en el siglo XVIII. El telescopio mostró que el Cosmos era inmensamente más complicado de lo que antes se había sospechado. El microscopio reveló tipos completamente nuevos de seres vivos, así como nuevas estructuras (por ejemplo, las células) en los seres vivos ya conocidos. Una invención más reciente es el radiotelescopio, que ha revelado muchos objetos astronómicos nuevos (los quasars, por ejemplo) y ha detectado un mar de radiación de ondas electromagnéticas que atraviesa todo el espacio, un vestigio de los primeros días del Universo. Otro avance revolucionario es el acelerador de partículas, que ha servido para revelar una cantidad inmensa de tipos distintos de partículas subatómicas. La actual teoría de los quarks referente a la estructura de los neutrones y los protones constituye una consecuencia directa de tal avance.

En consecuencia, una de las maneras de prever nuevos descubrimientos consiste en analizar cuáles serán los nuevos méto-

dos de observación que se introducirán a continuación. Esto resulta bastante fácil de predecir, porque tales métodos suelen surgir a través de la ciencia o la tecnología ya existentes. El empleo de nuevas técnicas experimentales también puede ayudar a contestar las preguntas ya conocidas por la ciencia. Los nuevos descubrimientos quizá sean más apasionantes, pero a los científicos les gustaría mucho poder solucionar algunos de nuestros actuales problemas mediante la introducción de nuevas técnicas de medición. En este capítulo expondré contestaciones a antiguas preguntas, y también nuevos descubrimientos que pueden surgir a partir de los nuevos medios de observación. Comenzaré por algunas técnicas nuevas que sirven para estudiar fenómenos cósmicos, y a continuación pasaré a exponer técnicas que son más adecuadas para los fenómenos de laboratorio.

LA VISIÓN DE LA GRAVEDAD

En la actualidad existe un grupo de notables técnicas experimentales cuyo desarrollo permitirá observar las ondas de la gravedad. Estamos habituados a pensar que la gravedad es algo que actúa de manera permanente entre dos objetos. Sin embargo, una de las consecuencias de las teorías utilizadas para describir la gravedad —sobre todo la teoría general de la relatividad de Einstein— consiste en que la gravedad posee otro aspecto. En realidad, los efectos de la gravedad —las distorsiones del espacio-tiempo— se «separan» de los cuerpos con masa que les dan origen, y viajan a través del espacio a la velocidad de la luz hasta que se encuentran con otros objetos, cuyo movimiento pueden entonces afectar.

Este fenómeno es semejante a lo que ocurre con el electromagnetismo, que puede asumir la forma de ondas luminosas o de ondas de radio. Las ondas de la gravedad —como las de la luz— pueden existir en muchas longitudes distintas, que dependerán del movimiento del objeto que produce las ondas. La diferencia reside en que las ondas luminosas han sido observadas desde que existen seres humanos, y las ondas de radio desde el siglo pasado, mientras que aún no han sido observadas las ondas de la gravedad. El efecto de las ondas de la gravedad sobre un objeto cuyo tamaño es de sólo unos cuantos metros, es mucho más pequeño que el correspondiente efecto de las ondas

electromagnéticas, y por lo tanto se vuelve mucho más difícil detectarlas. Los buenos detectores de ondas electromagnéticas —el ojo humano, por ejemplo— pueden observar señales que tengan únicamente 10^{-12} vatios, que es la cantidad de luz que llega hasta el ojo desde la estrella de menor intensidad. Los mejores detectores de ondas de gravedad que existen en la actualidad se muestran sensibles a señales que tengan como mínimo 10^{-9} vatios, lo cual equivaldría en el caso de la luz a la señal producida por el láser más intenso que existe.

Además, los objetos suelen producir ondas gravitatorias en mucha menor cantidad que ondas electromagnéticas. Uno de los motivos es que la mayoría de los objetos se mueven con lentitud, y las ondas gravitatorias son producidas de forma efectiva sólo por aquellos objetos cuya velocidad es cercana a la de la luz. Otro motivo es que la gravitación es una fuerza intrínsecamente más débil que el electromagnetismo. Como consecuencia, hemos de basarnos en los orígenes cósmicos de las ondas gravitatorias con objeto de estudiarlas. No parece probable que, en un futuro previsible, estemos en condiciones de generar en nuestros laboratorios ondas gravitatorias detectables, de forma semejante a la empleada por Heinrich Hertz para generar ondas de radio.

A pesar de ello, se están desarrollando técnicas que se muestren sensibles a las ondas gravitatorias que creemos que llegan a la Tierra desde las estrellas de neutrones en formación, por ejemplo. Estas técnicas se basan en la manera en que las ondas gravitatorias entran en interacción con la materia, y que produce fuerzas parecidas a las de la marea en los objetos con los que se encuentran dichas ondas. Imaginemos cuatro masas de gran peso colocadas en el extremo de los brazos de una cruz. Una onda gravitatoria que incida sobre dichas masas hará que se desplacen a lo largo de cada brazo en dirección a la otra, reduciendo dicho brazo, mientras que el otro brazo se prolongara, dado que la masa en su extremo se apartará. La distancia real que recorrerá cada masa será extremadamente pequeña, quizá sólo 10^{-19} centímetros (mucho menor que el diámetro de un núcleo atómico) en el caso de una onda con una magnitud detectable.

No obstante, esos desplazamientos tan pequeños han de medirse de diversas formas. Existe un dispositivo —llamado interferómetro de láser— que utiliza el siguiente hecho: si la luz

que procede de una fuente luminosa intensa se divide en dos haces, y cada uno de éstos sigue un camino distinto antes de que vuelvan a combinarse, la intensidad del haz combinado muestra entonces un característico patrón de franjas claras y oscuras, en función de las diferencias de longitud del camino recorrido. Para emplear un interferómetro de láser como detector de ondas gravitatorias, se colocan grandes masas en los extremos de dos largos brazos perpendiculares, que son atravesados una y otra vez por el rayo láser (fig. 18). Cuando una onda gravitatoria desplaza las masas, aumenta la distancia recorrida por la luz a lo largo de uno de los brazos, mientras que disminuye la otra distancia. Este cambio provoca una modificación observable en el patrón de franjas claras y oscuras, que al ser medida nos transmite información sobre la onda gravitatoria.

Hasta ahora no se han detectado efectos de este tipo en los prototipos de detectores de ondas gravitatorias que se han construido, pero se espera que —dentro de los próximos diez años— se fabriquen interferómetros de láser sensibles a ondas gravitatorias con una intensidad de sólo 10^{-3} vatios, o incluso menos aún. Esto implicará un mejoramiento de un billón de veces con respecto a los detectores actuales. También se están investigando otras técnicas de detección de ondas gravitatorias; una de ellas mide el cambio que se produce en la luz creada por un láser cuando la región en que se origina la luz modifica su tamaño debido al paso de ondas gravitatorias.

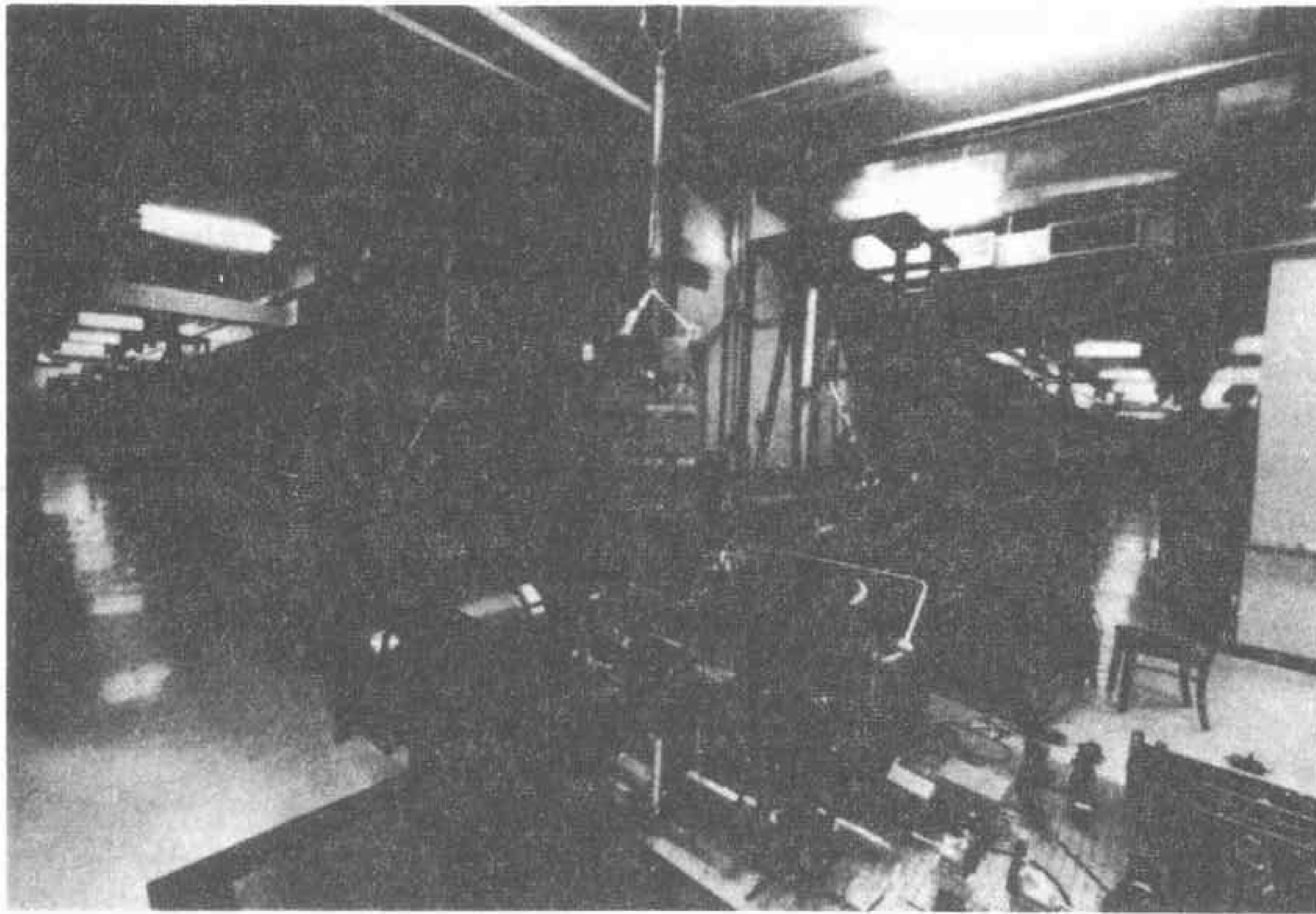


Fig. 18. Detector de ondas gravitatorias. En este prototipo de detector de ondas gravitatorias que emplea la interferometría por láser, los haces de láser pasan una y otra vez a lo largo de los largos tubos que aparecen en la imagen, y son analizados por los detectores situados en la jaula de alambre.

Hay otro aspecto lateral en la investigación de las ondas gravitatorias. Los cambios que éstas provocan en los objetos de tamaño corriente son tan pequeños que es preciso aplicar a dichos objetos las leyes de la teoría cuántica para comprender sus respuestas. En la actualidad, se está construyendo en el Instituto de Tecnología de California un prototipo de detector gravitatorio que contiene largas barras de metal, con una masa de aproximadamente una tonelada. Supongamos que cada barra es golpeada por una onda gravitatoria cuya fuerza se halle dentro de la gama detectable. El cambio de longitud de las barras será de unos 10^{-19} centímetros. Esta cifra equivale aproximadamente al volumen de la incertidumbre correspondiente a la longitud de la barra que predice la teoría cuántica, debido al efecto del principio de Heisenberg. Esto implica que las mediciones que se lleven a cabo a este nivel de precisión —y en las que intervengan objetos de gran tamaño, como el detector de ondas gravitatorias— deben tener en cuenta los principios de la teoría cuántica que hasta ahora sólo han sido necesarios para estudiar objetos atómicos o subatómicos.

La detección de ondas gravitatorias —en sí misma considerada— constituiría una demostración adicional en favor de la teoría general de la relatividad de Einstein. Además, un estudio de los objetos cósmicos que emiten tales ondas nos dará una nueva e importante información acerca del Universo. En general, las clases de sistemas que producen ondas gravitatorias deben tener gran cantidad de partes muy densas que se mueven a una velocidad cercana a la de la luz. Un ejemplo de este sistema consistiría en una pareja de estrellas de neutrones que giren en órbitas recíprocas, a una distancia muy poco mayor que sus tamaños. Las velocidades orbitales serían parecidas a la de la luz. Existen pruebas indirectas de que una pareja de objetos de este tipo emite efectivamente ondas gravitatorias. Las prue-

bas no proceden de la detección de las ondas en la Tierra, sino del efecto que produce en el movimiento de las estrellas la continuada pérdida de energía mediante la emisión de dichas ondas. Otros ejemplos —aún no observados empíricamente— serían las últimas fases del colapso de una estrella que se transforma en un agujero negro, o la unión de dos agujeros negros.

No sabemos cuántos objetos de esta clase hay en el Universo, y ni siquiera cuáles son los diferentes tipos que pueden existir. A los científicos les interesan los objetos de este tipo por muchas razones, una de las cuales es que su descripción exige un empleo preciso de la teoría general de la relatividad, en vez de las versiones meramente aproximadas que han sido suficientes hasta ahora. Cuando empecemos a detectar de manera sistemática las ondas gravitatorias, nuestro conocimiento cualitativo y cuantitativo acerca de los objetos de alta densidad que hay en el Universo aumentará enormemente.

Como las ondas gravitatorias interactúan tan débilmente con la materia, atraviesan cualquier objeto que no sea un agujero negro. Esta situación difiere de la de las ondas electromagnéticas, que sólo pueden desplazarse cortas distancias a través de la materia antes de ser absorbidas, y que por lo tanto llegan hasta nosotros desde las superficies externas de los objetos que las emiten. Las ondas gravitatorias pueden provenir del núcleo central de un objeto. Si se producen cambios súbitos y rápidos en el movimiento existente en el interior de las estrellas de neutrones, por ejemplo, pueden generarse ondas gravitatorias que —al ser detectadas— brindarán información sobre el interior de dichas estrellas. (Por desgracia, ni siquiera las ondas gravitatorias pueden huir de la atracción de un agujero negro, y por eso no se las puede emplear para conocer el inaccesible interior de tales objetos.)

Existe otro hipotético origen de ondas gravitatorias que quizás esté a nuestro alcance cuando dispongamos de detectores lo bastante sensibles. En ciertos modelos que se han propuesto con respecto al Universo inicial, la energía media de las partículas del Universo era enormemente elevada, tan elevada que en los primeros instantes se produjeron ondas gravitatorias en la misma cantidad que ondas electromagnéticas. Sin embargo, los cálculos teóricos efectuados al respecto implican que la rápida expansión del Universo inicial redujo con tanta rapidez la densidad de la materia que el Universo se volvió transparente a las

ondas gravitatorias casi de inmediato. Estas ondas gravitatorias, vestigios del alba del Universo, quizá hayan sobrevivido hasta hoy, en cantidades semejantes a las microondas que han sido observadas mediante radiotelescopios. En tal caso, empleando detectores más sensibles que los que ahora se construyen podrían observarse las ondas gravitatorias del Universo inicial. Si las detectásemos, nos proporcionarían nuevos datos sobre las condiciones existentes en los primeros instantes del Universo. Si no las encontramos una vez que dispongamos de detectores lo bastante sensibles para su magnitud previsible, esto puede significar que desde la época en que se produjeron hasta el momento presente ha tenido lugar algún proceso que eliminó estas ondas gravitatorias «fósiles». Por supuesto, también valdría la pena saber si esto ha sido realmente así.

En uno de los modelos propuestos acerca del Universo primitivo —y que recibe el nombre de Universo inflacionista— se supone que en los instantes iniciales tuvo lugar una expansión particularmente rápida, inmediatamente después de haberse producido las primeras ondas gravitatorias. Esta rápida expansión habría diluido la concentración de todo lo existente antes de la expansión —incluidas las ondas gravitatorias— hasta unos niveles tan bajos que serían inobservables en el Universo actual (lo cual no sería el caso si la rápida expansión inicial jamás hubiese tenido lugar). En este modelo inflacionista, los objetos tales como partículas subatómicas y fotones que existen en el Universo actual se han producido en todos los casos después de haber finalizado la rápida expansión inicial, cuando comenzó la expansión más pausada que continúa produciéndose en la actualidad, momento en el cual la temperatura del Universo era demasiado baja para producir un volumen significativo de ondas gravitatorias. Por eso, el hallazgo de ondas gravitatorias en cantidades semejantes al volumen ya observado de microondas desafiaría el modelo inflacionista del Universo primigenio.

En la actualidad, se están desarrollando otros medios para obtener nuevos datos acerca de los objetos astronómicos. Uno de ellos implica el empleo del telescopio espacial, un telescopio óptico y sensible a los rayos infrarrojos que se colocará en el espacio, en un lugar donde no se vea afectado por la distorsionadora influencia de la atmósfera terrestre. Estará en condiciones de captar objetos muy pequeños o muy distantes con más efec-

tividad que los telescopios situados en la Tierra. También podrá detectar algunos objetos que emiten casi exclusivamente ondas infrarrojas, que resultan en su mayoría invisibles a través de la atmósfera. Entre éstos podrían encontrarse los primeros datos concluyentes sobre la existencia de planetas que giren alrededor de estrellas distintas a nuestro Sol. Incluso un planeta tan voluminoso como Júpiter, en órbita alrededor de otra estrella, sería muy difícil de detectar mediante la luz visible debido a la intensidad de la luz producida por la estrella. Debido a la posibilidad de minimizar el efecto de la gravedad sobre los telescopios que giren en órbitas alrededor de la Tierra, éstos podrían llegar a ser mucho mayores que los situados en la superficie de nuestro planeta. Habrá que comprobar si esta nueva tecnología llevará a cambios radicales en nuestra imagen general del Universo astronómico. En mi opinión, resulta más probable que tales cambios provengan de un nuevo medio de observación, tal como los detectores de ondas gravitatorias.

LA CAZA DE FÓSILES CÓSMICOS

Un enfoque distinto para examinar el contenido desconocido del Universo implica buscar partículas subatómicas individuales, en vez de objetos astronómicos. La imagen referente a la evolución de la materia en el Universo primitivo que se describió en el capítulo 1 sugiere que las formas de materia que existen en la actualidad sólo son una pequeña fracción de las que han existido con anterioridad. La mayoría de las demás formas desaparecieron hace mucho tiempo, porque se convirtieron en inestables después de una fase de transición.

Sin embargo, algunas partículas todavía no descubiertas quizá hayan persistido hasta hoy. Para que sucediese tal cosa, estas partículas tendrían que tener un ciclo vital más prolongado que la edad actual del Universo. Éste podría ser el caso si una partícula posee alguna propiedad que se conserva (que no cambia con el tiempo) o que casi se conserva. Así es como han sobrevivido los protones hasta nuestros días. Tienen una propiedad que se denomina número bariónico, que casi se conserva, y ninguna de las partículas más ligeras en las cuales se podrían transformar los protones posee tal propiedad.

Estas partículas «fósiles» quizás existen todavía, aunque en cantidades reducidas. No estamos en condiciones de calcular de manera fiable cuántas han sobrevivido desde la época inicial del Universo. De manera esporádica los físicos han buscado determinados tipos de estas partículas, por ejemplo, los monopolos magnéticos y los quarks libres, pero todavía no se ha efectuado un esfuerzo sistemático para hallarlas.

Se ha venido desarrollando una estrecha relación entre la física de las partículas y la cosmología, lo cual es probable que estimule una vigorosa búsqueda de partículas fósiles. Hasta hace poco, los físicos que se dedicaban al estudio de las partículas tendían a considerar que no valía la pena comprobar experimentalmente los modelos cosmológicos, y dejaban esta clase de investigaciones a los astrofísicos. En la actualidad se considera que la caza de fósiles es una extensión natural de la física de partículas de laboratorio, y por lo tanto ambas han unido sus fuerzas. Una de las causas de ello es haber caído en la cuenta de que el análisis de ciertos aspectos del Universo inicial puede arrojar luz sobre algunos aspectos del Universo actual, por ejemplo, el predominio de la materia sobre la antimateria.

También hay una razón práctica para el cambio de actitud de los físicos dedicados al estudio de las partículas. Se han utilizado aceleradores de alta energía para estudiar aquellos tipos de partículas —estables o inestables— que pueden existir con masas hasta 50 veces superiores a las de un protón. Si en la actualidad existen partículas fósiles desconocidas aún, su masa tendría que ser tan grande que resultaría imposible de crear con los actuales aceleradores. Algunas teorías predicen la existencia de partículas subatómicas cuyas masas son tan elevadas que es improbable que jamás lleguemos a crearlas (debido a que se requerirían cantidades inmensas de energía y un costo elevadísimo). Sin embargo, tales partículas pueden haberse producido al comienzo del Universo y —si tenían una vida larga— quizá hayan sobrevivido hasta la época actual, aunque sea en pequeñas cantidades. Una partícula fósil de esta clase sólo podría hallarse a través de los métodos de detección que describiré en seguida.

Dentro del Universo en conjunto, se considera que las partículas fósiles pesadas —aquellas cuya masa es mucho mayor que la de los protones— son muy infrecuentes, en comparación con los quarks y los electrones que forman la materia corriente. Esto se sabe mediante un razonamiento indirecto. Basándonos

en las observaciones acerca del ritmo de expansión del Universo, poseemos una noción bastante precisa de la densidad de energía total (la energía media por unidad de volumen) que hay en el Universo. Existen numerosos protones y neutrones que podemos detectar directamente, puesto que forman parte de estrellas visibles o de materia interestelar también visible. La densidad de energía de estos protones y neutrones visibles es por lo menos un 5 % del máximo de densidad de energía que sabemos que puede existir. También es posible que existan protones y neutrones que no estén emitiendo luz, y que por consiguiente no hayan sido detectados (por ejemplo, aquellos que forman las estrellas oscuras). De ello se deduce que la densidad de energía debida a partículas fósiles pesadas no puede ser mucho mayor que la de los protones y neutrones visibles. Si una partícula posee una gran masa, también tiene una gran energía de reposo, porque la energía de reposo es proporcional a la masa. Como la densidad de energía de una partícula es el producto entre su energía de reposo y su densidad numérica, si determinada especie de partícula posee una energía de reposo mucho mayor que la de un protón, su densidad numérica será proporcionalmente menor. Si una partícula posee una energía de reposo mil veces mayor que la de un protón, su densidad numérica no puede ser mucho mayor de una milésima de la que corresponde a los protones. Ciertos argumentos teóricos también indican que la tasa de supervivencia con respecto a la aniquilación en el Universo primitivo sería muy baja en el caso de las partículas con mucho peso, cosa que explicaría su escasez relativa en el Universo actual.

Para cazar estas partículas pesadas, los físicos han vuelto a una antigua práctica. Hasta alrededor de 1950, cuando los experimentos realizados con los aceleradores de partículas comenzaron a revelar los ricos detalles de los estados de los quarks enlazados, la mayor parte de los descubrimientos de nuevas partículas surgieron de un estudio de la radiación cósmica, la corriente de partículas cargadas de energía que atraviesa el Universo y que bombardea la Tierra de manera constante. Estos experimentos con rayos cósmicos hallaron nuevas partículas, que eran un producto secundario de las colisiones entre los protones de los rayos cósmicos y los átomos, en la atmósfera terrestre. Es probable que tales experimentos sean menos importantes en el futuro, porque ni siquiera las partículas de rayos cósmicos

con más energía, al entrar en colisión con átomos en reposo, pueden crear nuevas partículas cuyas masas tengan una masa diez mil veces mayor que la de los protones. Dentro de no mucho tiempo estaremos en condiciones de producir tales partículas en un laboratorio, y de manera más fiable. Los futuros experimentos, en cambio, se dedicarán a buscar las escasas partículas con carga que existan en la radiación cósmica primaria.

Para obtener una idea acerca de lo que involucra esta clase de búsqueda, imaginemos que existe alguna partícula fósil, con una energía de reposo mil millones de veces mayor que la de un protón, pero con la misma carga eléctrica que éste. Ciertas teorías sobre las partículas subatómicas indican que tales partículas pueden existir en la realidad. Si en el Universo actual no existen este tipo de partículas, entonces su cantidad total tiene que ser por lo menos mil millones de veces menor que la cantidad de protones. En caso contrario, la densidad de energía almacenada en dichas partículas sería mayor de lo que correspondería a las observaciones acerca de la rapidez con la que se está expandiendo el Universo. Resulta plausible que —si esta partícula pesada y con carga se hallase en la radiación cósmica— se la encontraría con una frecuencia inferior a una por cada mil millones de protones que se contasen. Específicamente, esto quiere decir que cada segundo caerían unas diez partículas de esta clase sobre cada kilómetro cuadrado de superficie de la Tierra.

Es posible que ciertos procesos hayan incrementado la concentración de estas partículas en nuestra región del Universo, en comparación con su densidad media. Si así fuesen las cosas, detectaríamos grandes cantidades de estas partículas, pero no nos podemos permitir diseñar experimentos que confíen excesivamente en tal posibilidad. Las escasas cifras que podemos esperar dan a entender que, si queremos buscar esta clase de partículas y llegar a estudiar sus propiedades, necesitaremos emplear sistemas de detección muy amplios o proyectar experimentos que duren muchos años. Algunos de estos experimentos ya han comenzado.

La búsqueda más sencilla sería la de partículas con propiedades semejantes a las de las partículas con carga ya conocidas, pero mucho más pesadas. A menos que se muevan muy lentamente, tales partículas tendrán un gran volumen de energía cinética debido a su gran masa. No perderán demasiado de esta energía a través de las colisiones, y serán detectadas con facili-

dad mediante los detectores estándar utilizados en el caso de las partículas con carga. Tales detectores —los modernos descendientes de los contadores Geiger— funcionan utilizando los efectos de los electrones expulsados por los átomos cuando pasa a escasa distancia una carga en rápido movimiento. Si la carga pesada puede ionizar los átomos de este modo, para observarlos sólo sería preciso repartir numerosos detectores en una amplia zona, y esperar que uno de ellos diese una señal de ionización debido a la carga pesada. Esta señal podría consistir en un volumen excesivamente elevado de ionización, en comparación con la producida por una partícula de masa reducida, pero con la misma energía cinética. Esta estructura de detectores podría abarcar muchos kilómetros y permanecer durante varios años en su sitio. Estos experimentos se podrían automatizar con facilidad, y ser comprobados de forma periódica.

No obstante, si la partícula con carga se mueve a menos de una diezmilésima de la velocidad de la luz, se vuelve más difícil de detectar. En tales circunstancias no puede lograr con facilidad que los átomos expulsen electrones. La detección de partículas con carga de movimiento lento es un problema aún por resolver, aunque resulta posible diseñar métodos efectivos para conseguirlo. Sin embargo, es probable que esto no sea necesario. La fuerza gravitatoria ejercida por nuestra Galaxia sobre cualquier partícula de esta clase que se mueva a través del espacio interestelar la acelera hasta alcanzar velocidades que suelen ser por lo menos diez veces mayores. Cuando las partículas se encuentran con la Tierra durante sus viajes, es probable que tengan por lo menos esta velocidad con respecto a la Tierra, y en consecuencia podrían observarse mediante la ionización que produzcan.

Puesto que la mayoría de detectores de partículas subatómicas «funcionan» respondiendo a la ionización causada por la carga eléctrica de la partícula, hay que utilizar métodos diferentes para detectar partículas fósiles eléctricamente neutras. Ciertas partículas neutras pueden llevar a cabo fuertes interacciones no electromagnéticas con átomos ordinarios. Si sucede tal cosa, existiría una gran probabilidad de que se emitiese una señal al pasar a través de un detector, siempre que éste tenga un grosor de varios metros. Tales señales no serían consecuencia de la ionización, sino de colisiones con el núcleo atómico. Los neutrones pueden detectarse de esta forma. Por lo tanto, estas partículas neutras de interacción fuerte podrían buscarse a través de disposiciones de detectores como los descritos más arriba, y la única diferencia consistiría en la forma específica en que la partícula neutra interactúe con el detector.

Existe otro posible origen de la señal que produciría el tipo de colisión que acabamos de describir: grandes flujos de neutrinos con alta energía. Se denomina genéricamente neutrinos a las partículas neutras de espín 1/2, sin interacciones fuertes; en la actualidad se conocen tres tipos, todos ellos con una masa muy pequeña o incluso igual a cero. Sin embargo, algunas teorías predicen la existencia de neutrinos con masa muy considerable.

Los tipos conocidos de neutrinos existen como vestigios fósiles del Universo primitivo. También pueden ser producidos por colisiones de partículas de rayos cósmicos con átomos de la Tierra. Incluso los neutrinos producidos en el laboratorio son difíciles de detectar, porque cada neutrino sólo posee una pequeña probabilidad de interactuar con los átomos en un detector. Debido a esta reducida probabilidad de interacción, se dice que los neutrinos sólo tienen interacciones débiles. Hasta en el caso de neutrinos con una energía muy elevada —para los cuales existiría una máxima probabilidad de interacción— un detector habría de tener un grosor de cientos de miles de kilómetros para estar en condiciones de detectar cada neutrino que incida en él. Es imposible construir detectores de tales dimensiones, y sólo una pequeña fracción de los neutrinos que pasen a través de un detector de tamaño razonable dejarán señal de su paso. Como resultado, sólo se puede observar una cantidad significativa de neutrinos si el número de éstos que incide en el detector es muy grande. Por ejemplo, si la cantidad de un tipo de neutrino que choca con la Tierra fuese tan elevada como la cantidad de protones de los rayos cósmicos primarios, y la probabilidad de interacción fuese tan reducida como se espera, un detector que contenga un millón de toneladas de materia detectaría alrededor de un neutrino por segundo, mientras que detectaría millones de partículas cargadas. En el caso de una cifra inferior de neutrinos —o si se emplean detectores más pequeños— la tasa de detección probable disminuiría en el porcentaje correspondiente.

Algunos físicos han estudiado la ingeniosa idea de adaptar elementos naturales —por ejemplo, los océanos— para que sir-

van como detectores de neutrinos de alta energía. De acuerdo con este enfoque, todos los átomos de un gran volumen de materia constituirían un blanco posible para los neutrinos. Esta gran cantidad compensaría lo escaso de la probabilidad de que el neutrino interactúe con cada átomo individual. Un proyecto, que recibe el nombre de DUMAND, está tratando de utilizar un kilómetro cúbico (mil millones de toneladas de agua) del océano Pacífico como detector de neutrinos (fig. 19). La idea consiste en que los neutrinos de alta energía que choquen contra el océano a veces interactuarán con los átomos del océano y producirán partículas con carga. Estas partículas con carga y de alta energía podrán detectarse porque producen radiación electromagnética al pasar a través del océano. Dicha radiación se observa colocando dentro del océano gran cantidad de detectores de radiación, llamados fotomultiplicadores. Se ha calculado que el proyecto DUMAND logrará detectar unos diez neutrinos que interactúen, entre los que incidan sobre este sector del océano durante un año. A pesar de lo reducido de este número, esto significaría que el proyecto DUMAND es sensible a una diversidad de hipotéticos orígenes de neutrinos, tales como agujeros negros de evaporación rápida, que producirían neutrinos de tipos conocidos, con masa reducida y energía elevada.

Estos detectores tendrían una aplicación potencialmente más interesante: el descubrimiento de flujos de neutrinos fósiles de masa elevada. Un flujo de 10^{-10} neutrinos por centímetro cuadrado y por segundo llevaría a la observación de unas diez interacciones por año, suponiendo que la fuerza de interacción de estos neutrinos con la materia corriente sea aproximadamente la misma que la de los neutrinos conocidos. Quizás esto llegue a ser un modo efectivo de detectar neutrinos fósiles de gran masa, aunque sean infrecuentes, siempre que la densidad de energía total que posean sea de una magnitud semejante a la de los protones.

Se plantea otro problema para la detección de partículas neutras fósiles de energía muy baja. Debido a ciertas razones teóricas muy convincentes, los científicos están seguros de que existen partículas fósiles de este tipo, incluyendo los tres tipos conocidos de neutrinos. Perdurarían desde el período correspondiente a un segundo después del *Big Bang*, momento en el que se produjeron en gran cantidad. Hemos visto que si existe gran número de tales partículas, y aunque tengan una energía

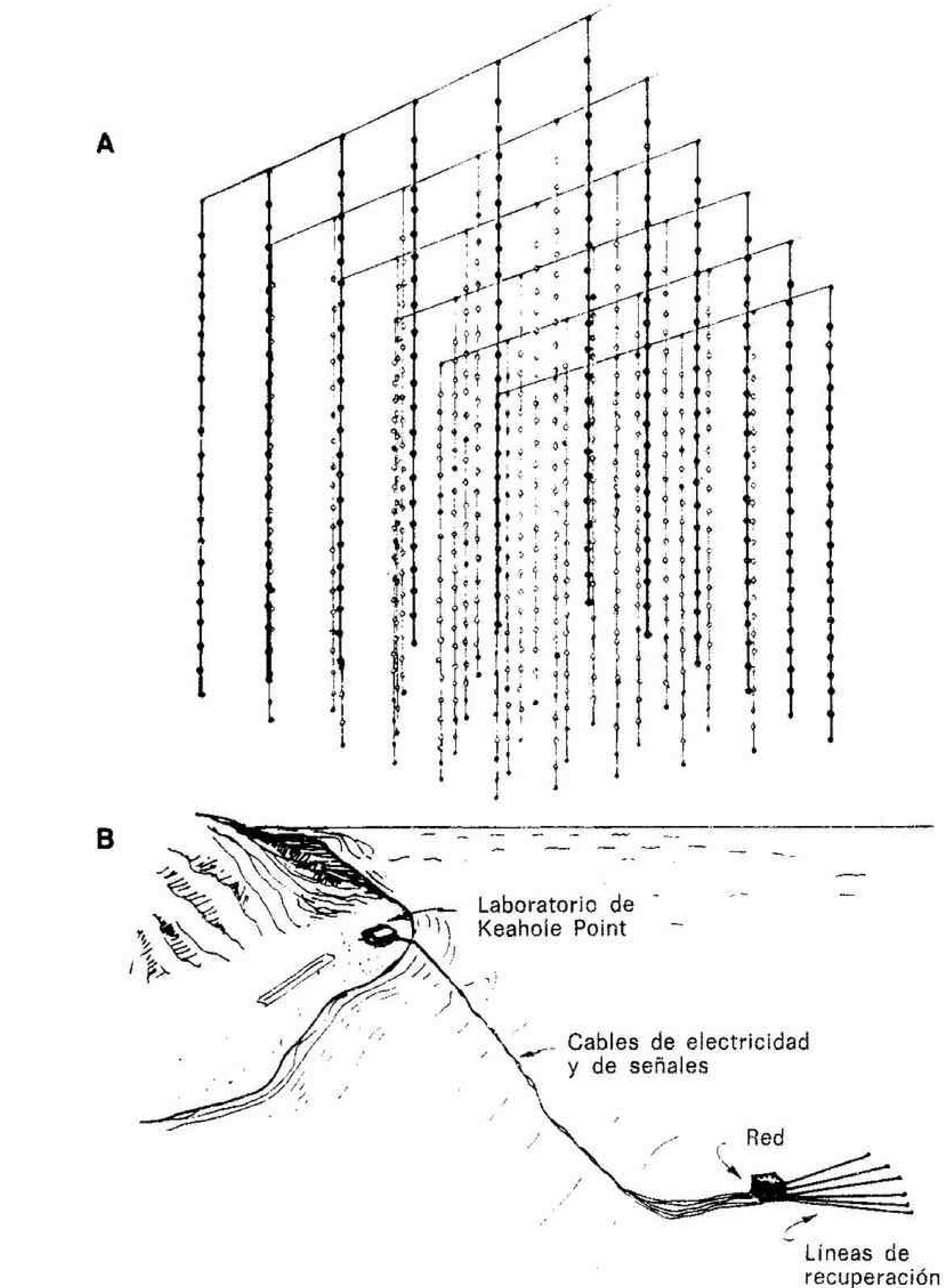


Fig. 19. Detector DUMAND de neutrinos procedentes del espacio. *A* muestra una representación esquemática de una red de fotodetectores utilizados para observar los efectos de la interacción submarina de neutrinos con alta energía. *B* muestra cómo se desplegaría esta red en el océano Pacífico.

de reposo individual muy pequeña, su densidad de energía total equivaldría a la de la materia visible en el Universo. Se ha sugerido esta posibilidad, basándose en diversas teorías acerca de las partículas subatómicas. Saber cuáles son los principales elementos constitutivos del Universo, por lo que respecta a su contenido de energía, es algo de la máxima importancia científica. Hemos visto que esta posibilidad también es relevante para la cuestión acerca de si el Universo es finito o infinito. En vez de permitir que esta pregunta permanezca en poder de la física y la cosmología teóricas, sería deseable diseñar métodos experimentales para la observación directa de tales partículas.

La detección de estas partículas plantea problemas inmensos. Aunque quizás existan en cantidades muy grandes en comparación con las partículas de energía elevada, sus energías cinéticas también resultarían demasiado pequeñas para producir ionización o interacciones observables con los núcleos, por más que estuviesen aceleradas por campos gravitatorios galácticos o intergalácticos. El mismo problema se plantea con respecto a los gravitones, partículas que acompañan a las ondas gravitatorias. Los gravitones interactúan con los átomos individuales de una forma aún más débil que la de la mayoría de las partículas fósiles que tengamos la esperanza de detectar. Hemos visto que las ondas gravitatorias deben detectarse a través de su interacción con objetos macroscópicos, y no con átomos individuales. Quizá se pueda emplear un enfoque semejante para detectar los neutrinos de interacción débil.

Podemos tratar de idear objetos compuestos de muchos átomos, que tendrán una probabilidad mayor de entrar en interacción con estas partículas. Supongamos que una onda incide sobre un objeto que contiene cien átomos. Si el objeto es mucho mayor que la longitud de la onda en cuestión, los átomos individuales del objeto dispersarán la onda con independencia recíproca, y la probabilidad de conjunto de que la onda se disperse siguiendo un ángulo determinado —por ejemplo, de 10 grados— será cien veces mayor que la que permitiría un único átomo. Esto recibe el nombre de dispersión incoherente. Sin embargo, si se dispersa una onda que posea una longitud mayor —comparable al tamaño del objeto— la probabilidad de dispersión se incrementa mucho, y llega a ser 10.000 veces mayor que la de un único átomo. A esta interacción incrementada —en la cual la probabilidad de que la onda se disperse siguiendo determinado ángulo es proporcional al cuadrado de la cantidad de átomos existentes en el objeto que actúa como blanco de incidencia— se la conoce con el nombre de dispersión coherente.

Una de las consecuencias de la teoría cuántica es que cada partícula está vinculada con una onda, cuya longitud está determinada por el momento cinético lineal (masa por velocidad) de la partícula. (Cuanto menor sea el momento cinético lineal, mayor será la longitud de onda.) Utilizando esta relación, podemos determinar la longitud de onda de cualquier partícula cuyas propiedades conozcamos. Algunas de las partículas fósiles de masa reducida que constituirían interesantes blancos de caza pueden tener longitudes de ondas de muchas micras. Esto implica que se dispersarán coherentemente a partir de objetos cuyo tamaño es de muchas micras. Tales objetos pueden contener billones de átomos. La probabilidad de que se dé una dispersión coherente será billones de veces mayor que la de una dispersión incoherente. Este incremento en la dispersión bastaría para convertir en detectables a tales partículas. Ya se han efectuado distintas sugerencias con respecto a esta clase de experimentos, y es probable que se lleven a cabo en un futuro no demasiado lejano.

No puede predecirse con exactitud cuál será el resultado de todas estas búsquedas de fósiles, pero creo que encontraremos más de lo que esperamos, de igual forma que en el pasado nos hemos topado una y otra vez con nuevos fenómenos, al emplear nuevos métodos de detección. Todo lo que descubramos servirá sin duda para extender el alcance de nuestras actuales teorías, e incluso es posible que las sustituya. En mi opinión, la caza de fósiles nos llevará a ámbitos previamente inexplorados.

INSTANTÁNEAS DEL NANOMUNDO

La vista humana es uno de los instrumentos más efectivos para explorar los fenómenos que se producen a una escala espacial de un milímetro de longitud o más, en períodos temporales de alrededor de un segundo. Debido a la estructura de nuestros ojos y a las propiedades de la luz visible, el órgano de la vista no es eficaz con respecto a objetos más pequeños y a cosas que cambien con una rapidez mucho mayor. Además, la visión humana se limita a las superficies de los objetos que son opacos a la luz visible. Hemos logrado ampliar en gran me-

dida el alcance de la visión natural utilizando instrumentos ópticos (microscopios, por ejemplo) y utilizando otras formas de radiación (por ejemplo, los rayos X). Sin embargo, todavía siguen ocultos muchos fenómenos.

Entre éstos se encuentran ciertos fenómenos biológicos que ocurren en las células vivientes. Por ejemplo, convendría estudiar los acontecimientos celulares a una escala espacial de nanómetros (10^{-9} metros) y a una escala temporal de microsegundos, cuando tiene lugar una división o cualquier otro hecho decisivo. En la actualidad nos hallamos incapacitados para ello. Para apreciar objetos que tengan una determinada dimensión, es preciso emplear métodos de exploración cuya longitud de onda sea igual o inferior al tamaño del objeto. Los objetos de dimensiones nanométricas exigen rayos X o electrones de alta energía. Un método como el de la difracción de rayos X nos proporciona información sobre estructuras a pequeña escala, pero exige una exposición prolongada, y trabaja mejor en el caso de estructuras medianas. El microscopio electrónico también puede mostrar pequeños detalles. Sin embargo, los objetos examinados deben prepararse de una forma que a menudo destruye parte de aquello que desearíamos explorar. La necesidad de una preparación previa dificulta el apreciar qué es lo que está ocurriendo en la célula a lo largo de un período de tiempo.

Las nuevas técnicas pronto superarán las limitaciones de la escala espacial, la escala temporal y la opacidad de los objetos. Dichas técnicas implican el uso de intensos haces de radiación de ondas cortas, en los que una propiedad que recibe el nombre de fase varía de manera regular entre uno y otro punto del haz. A esta radiación se la denomina radiación coherente. Se produce cuando numerosos electrones emiten radiación de una forma mutuamente dependiente, como en el caso de un láser. Sin embargo, es probable que la pequeñez de la escala espacial y la opacidad sólo se solucionen apelando a longitudes de onda aún más cortas que las producidas por los lásers normales. Quizá haya que crear lásers que funcionen a la longitud de onda de los rayos X o incluso de los rayos gamma, o es posible que empleemos radiación de onda corta procedente de otras fuentes de gran intensidad, por ejemplo, un acelerador de partículas llamado sincrotrón. Lo importante no es el modo específico en que se produzca la radiación, sino los nuevos tipos de observación que permitirá dicha radiación.

Imaginemos que podemos producir haces de rayos X que tengan longitudes de onda comprendidas entre uno y diez nanómetros, y una duración temporal de un picosegundo (10^{-12} segundos). Cada tipo diferente de átomo que haya en una célula o en otro sistema biológico dispersará los rayos X de un modo diferente, al igual que los diferentes órganos del cuerpo cuando se fotografían con rayos X convencionales. Como consecuencia, la imagen de la célula poseerá un excelente contraste; por ejemplo, las estructuras formadas por proteínas se distinguirán de las constituidas por ácido nucleico o por hidratos de carbono. En ciertas longitudes de onda, el haz penetrará todo el espesor de la célula, y cada uno de los átomos que se encuentre en su camino influirá sobre el haz que surja al final del recorrido. Esto significa que, al detectar el haz después de que atraviese una célula, dicho haz contendrá información sobre lo que ocurre en toda la célula, de igual modo que una placa de rayos X del cuerpo humano puede mostrar todos los órganos con los que la radiación se encuentra en su recorrido, y no sólo aquellos que están cerca de la superficie. Como es improbable que la célula logre sobrevivir a la exposición prolongada a un haz de rayos X, no es preciso efectuar perjudiciales procedimientos de preparación previa, y se examina la célula tal como es mientras tiene vida.

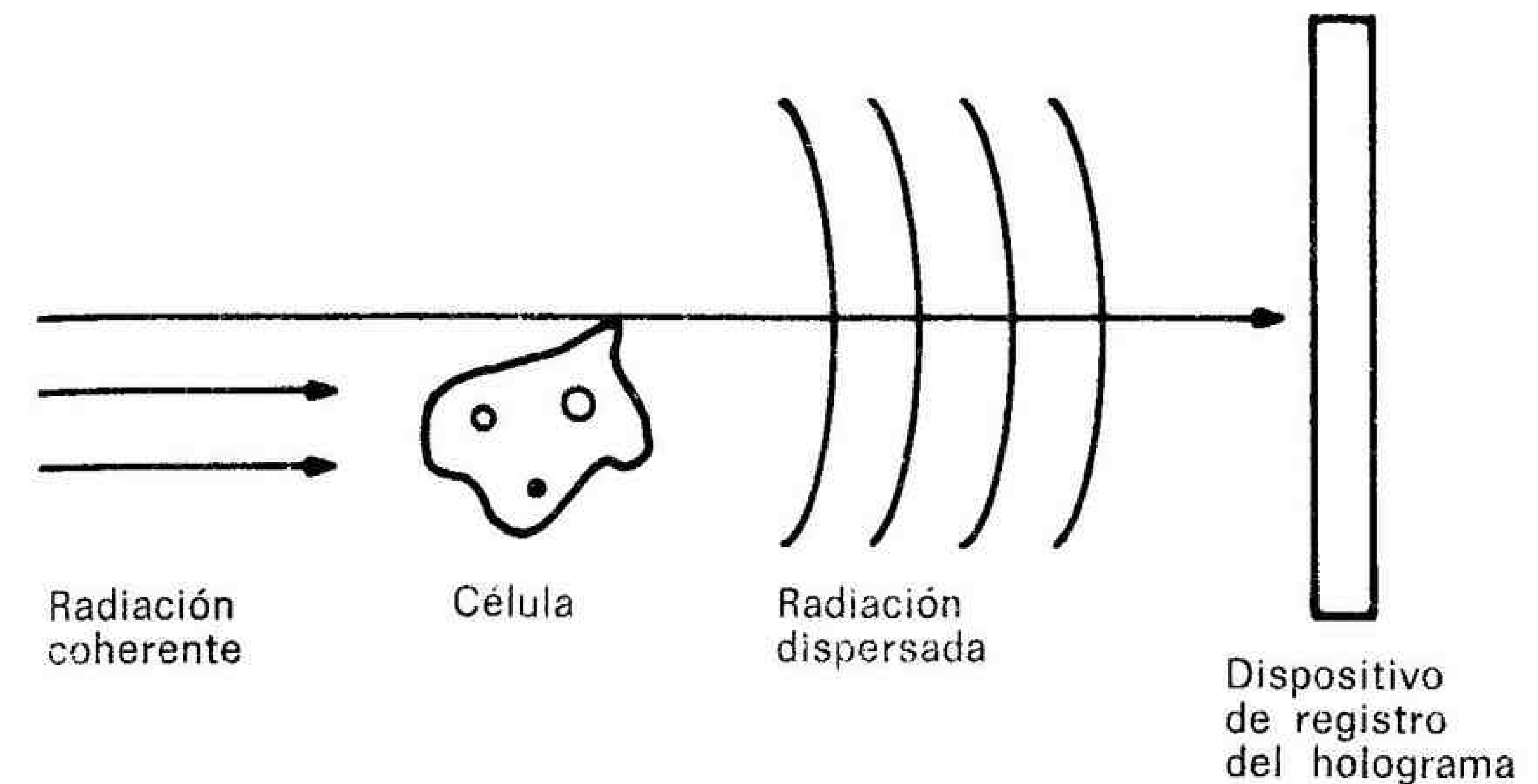
La breve duración del haz nos permitirá obtener información acerca de lo que ocurre dentro del objeto en momentos definidos con gran exactitud. Al emplear el haz, podemos detectar acontecimientos separados por intervalos cortos. Por ejemplo, se puede contemplar la secuencia de pasos mediante los cuales una molécula de proteína se pliega sobre sí misma para adquirir su forma biológicamente activa después de ser sintetizada. La pequeña longitud de onda de los rayos X hace posible observar partes del objeto cuyo tamaño no es mayor que el del átomo, lo cual incluye todos los objetos de interés biológico.

Puede emplearse una técnica especialmente interesante junto con la radiación coherente en onda corta: la holografía, que fue propuesta para ser utilizada con haces de electrones mucho antes de que se aplicase a la luz visible producida por lásers. En la holografía, un haz de radiación coherente incide sobre un objeto, y se registran tanto la intensidad como la fase del haz dispersado. Las técnicas corrientes de registro —por ejemplo, exponer una placa fotográfica a un haz no coherente— sólo alma-

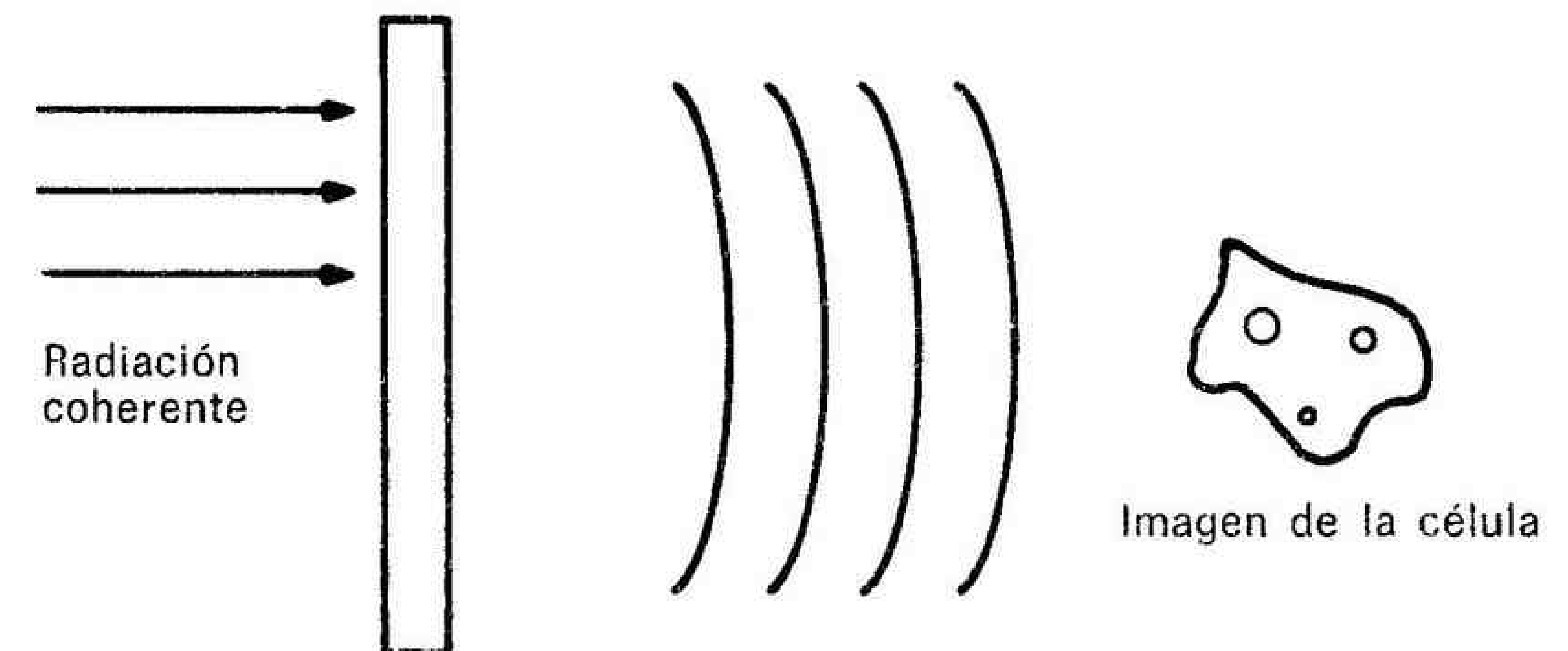
cenan la intensidad del haz, lo cual hace que se pierda su fase. Como consecuencia, en una fotografía ordinaria está ausente gran parte de la información acerca de la estructura tridimensional del objeto.

Una manera de almacenar información acerca de la fase y al mismo tiempo acerca de la intensidad del haz dispersado consiste en permitir que éste —cuando emerge del objeto— se centre en el mismo lugar que un haz de radiación coherente que se utilice como elemento de referencia. Los dos haces producirán un patrón de interferencia allí donde se superpongan. A continuación, puede medirse la intensidad de este patrón de interferencia, obteniendo lo que se llama holograma, y el patrón contendrá información sobre la fase del haz dispersado (fig. 20). A partir de esta información, es posible reconstruir la estructura tridimensional completa del objeto dispersado, digitalmente a través de una reconstrucción mediante computador, o de una forma más gráfica, iluminando el patrón registrado con luz coherente y contemplando la imagen resultante. Si la luz coherente utilizada para producir la imagen es una luz visible, que tenga una longitud de onda mucho más larga que la utilizada para registrar el patrón que se está visualizando, la imagen producida puede ser muy grande. Se podría ampliar la imagen holográfica de una bacteria hasta que llegue al tamaño de un gran perro dogo, sin que se produzcan distorsiones y con una completa información tridimensional.

Estas imágenes holográficas podrían revelar nuevas estructuras o subestructuras de importancia biológica, a una escala inferior a las que hemos podido contemplar hasta ahora. Ni la teoría ni las observaciones efectuadas por la biología molecular contemporánea niegan la existencia de estructuras tan minúsculas. Tales imágenes también podrían permitirnos ver directamente determinados aspectos de la estructura y la función biológica. Muchos de estos detalles no pueden obtenerse a partir de los métodos físicos existentes para visualizar macromoléculas; en cambio, hemos empleado métodos químicos. A pesar de todo, no hay ningún motivo por el cual los métodos biofísicos de observación de las nanoestructuras no puedan sustituir a los bioquímicos, cuando existan métodos de visualización que tengan la adecuada capacidad. Por ejemplo, las diferentes bases existentes en los ácidos nucleicos provocarían una diferente dispersión de los rayos X, al igual que los objetos que resultan visual-



A Proceso de registro de un holograma



B Reconstrucción de un holograma

Fig. 20. Holografía. En *A* se obtiene un holograma al iluminar un objeto con radiación coherente —como la procedente de un láser— y registrando al mismo tiempo el haz incidente y la luz que se dispersa. El holograma obtenido puede visualizarse atravesándolo con radiación coherente —como ocurre en *B*— para formar una imagen instantánea.

mente distintos ante nuestra vista dispersan de manera diversa la luz visible. Un holograma de rayos X podría determinar la secuencia de bases del ADN celular, o la secuencia de aminoácidos en diversas proteínas. Podríamos observar estos fenómenos con la misma claridad que la serie de dijes que forman una pulsera femenina.

No cabe aspirar a comprender en detalle los procesos vitales hasta que conozcamos qué hay en la célula, y cómo cambia este contenido microscópico a medida que se despliegan los procesos vitales. Probablemente este tipo de estructura temporal dentro de los procesos biológicos es tan importante para determinar la conducta de los seres vivientes como lo es la estructura espacial de las macromoléculas.

En los procesos vitales existen muchas escalas espaciales, desde los nanómetros hasta el tamaño propio de cada organismo. De igual modo, existen numerosas escalas temporales, desde los picosegundos hasta el ciclo vital completo de un organismo. Sabemos muy poco acerca de los procesos biológicos que tienen lugar con mucha rapidez, sobre todo si tienen lugar en una región muy pequeña del espacio. La holografía de rayos X promete suministrarnos tal información. Por desgracia, sin embargo, no podemos aspirar a efectuar «películas» holográficas de las células vivientes. La holografía de rayos X destruye velozmente las células sobre las que se aplica, y no es posible observar una única célula de forma continuada durante muchos segundos. Sin embargo, podemos realizar una especie de pseudopelícula aplicando holografía de rayos X a una serie de células semejantes, y combinando estos resultados para obtener una imagen continua.

Antes de estar en condiciones de emplear la holografía de rayos X hay que solucionar dos problemas. Uno de ellos consiste en crear un medio de producir haces coherentes de rayos X. El segundo es hallar un método adecuado para registrar la información contenida en el haz de rayos X después de que haya atravesado el blanco correspondiente. En el caso de los rayos X, la información varía a lo largo de una escala espacial de dimensiones atómicas, de manera que pequeñas variaciones en la composición del dispositivo de registro pueden provocar una considerable pérdida de información. Es probable que la manera más conveniente de evitar este problema consista en utilizar una técnica de visualización que expanda el haz dispersado, de

modo que los puntos que se encuentran muy cerca en el objeto estén mucho más separados en la imagen. Como alternativa, podemos elaborar sustancias con determinada estructura atómica, que sea la más adecuada para registrar tal información. En conjunto, no parece haber problemas insolubles para el desarrollo de la holografía de rayos X. Cabe esperar que pronto se convierta en una potente técnica para revelar estructuras y comportamientos a escalas temporales y espaciales más pequeñas que las exploradas hasta ahora.

Las nuevas técnicas de observación y de medida que he expuesto en este capítulo sólo son algunas de las muchas que los científicos están desarrollando en la actualidad. Como hemos visto, entre las nuevas técnicas y los nuevos descubrimientos existe una relación muy antigua. Un proceso mucho más nuevo —que acaba por influir sobre el patrón de los nuevos descubrimientos, tanto como las nuevas técnicas— utiliza métodos para el almacenamiento y el análisis de los datos obtenidos a través de la experimentación. Estos nuevos enfoques del proceso de datos están íntimamente vinculados con el empleo de la informática en la investigación científica. Este tema se estudiará en el capítulo 7.

PARTE III

UN PRÉSTAMO FECUNDO: LOS INFLUJOS EXTERNOS SOBRE LA CIENCIA

6. LA MATEMÁTICA: EL LENGUAJE CLÁSICO DEL ESPACIO, EL TIEMPO Y EL CAMBIO

Las nuevas técnicas de observación y de experimentación modifican la ciencia desde dentro, pero existen otras fuerzas intelectuales que actúan para cambiar la ciencia desde fuera. Una de estas fuerzas, la matemática, es tan antigua como la misma ciencia. Otra —que se utiliza desde hace menos de cincuenta años— es el computador electrónico. Considero que ambas son fuerzas «externas» porque —en ambos casos— existe un numeroso grupo de personas que trabajan para que avance esta disciplina, y que no se hallan primordialmente preocupadas por la posible relación que tenga con la ciencia. En muchos casos los científicos se limitan a adaptar a su propio trabajo estos progresos externos. En realidad, los científicos son consumidores de modelos matemáticos y de tecnología informática.

Esto no significa que los científicos individuales no sean libres de desarrollar sus propias ramas de la matemática o sus propios sistemas informáticos. Lo único que sucede es que, a medida que la matemática ya existente y los computadores eran cada vez más numerosos, a los científicos les pareció más conveniente utilizarlos en vez de desarrollar otros por su cuenta. Por supuesto, para que esto suceda, los científicos tienen que conocer los nuevos avances y tenerlos a su disposición. En el caso de las matemáticas, esto no siempre ha sido así. Sin embargo, parece estar aumentando el nivel de perfeccionamiento matemático entre los científicos; un mayor porcentaje de científicos se dedican a estudiar aspectos de las matemáticas que no tienen una aplicación inmediata en la ciencia. Por sí solo, este aumento llevará a un mayor empleo de las matemáticas en la ciencia del futuro.

Queda por ver cómo llegarán a manos de los científicos los nuevos sistemas informáticos. En este caso, la motivación económica probablemente se convierta en un factor importante. Aunque las aplicaciones científicas no sean la única fuente de ganancias potenciales, a menudo preparan el camino para otros usos, y quienes diseñan computadores hallarán la forma de que los científicos se pongan al corriente de los nuevos progresos. Es preciso advertir que una gran cantidad de personas con una formación científica de base están trabajando como diseñadores de sistemas informáticos. Como consecuencia, aparecerán de manera continuada nuevos computadores que serán de utilidad para la ciencia.

Existe la tendencia a pensar que los computadores son aparatos que sirven para dedicarse a la matemática, pero esto es cierto sólo en parte. Por lo tanto, aunque señalaré las áreas de solapamiento, discutiré separadamente estas dos fuerzas externas que actúan sobre la ciencia.

No puede decirse que las matemáticas siempre hayan colaborado en el progreso de la ciencia. Si no se entienden correctamente las leyes básicas de un sector de la ciencia, el intento de otorgar a dicha disciplina una formulación matemática a menudo se convierte en un ejercicio estéril. A pesar de todo, hay algo de verdad en la idea según la cual, cuanto más matemática resulta una disciplina, más carácter científico adquiere. Hoy día la matemática no sólo se utiliza en astronomía y en física, sino también en química, en biología e incluso en las ciencias sociales.

Si se pueden expresar en términos matemáticos las nociones básicas de una ciencia, más fácil resultará comprobar cuáles son sus implicaciones y sus predicciones. En las ciencias físicas, la utilización de la matemática se ha vuelto algo esencialmente automático; desde un principio, las leyes fundamentales casi siempre se expresan en una forma matemática. Cuando los físicos discuten conceptos entre sí, la discusión casi siempre se produce en términos matemáticos.

Los biólogos emplean menos la matemática para formular y probar sus hipótesis. Uno de los motivos es que, en la actualidad, los científicos que se dedican a la física conocen las leyes fundamentales de su materia de estudio mejor que los biólogos, y se hallan más capacitados para «controlarla». En muchos casos

los físicos pueden producir pequeñas variaciones en algún sistema, y a continuación emplear sus teorías para predecir cómo se comportará el sistema. Por ejemplo, los químicos pueden tratar de predecir cómo cambiará el ritmo de una reacción determinada, a medida que varía la concentración de las sustancias químicas que intervienen en dicha reacción. Los biólogos no han tenido la posibilidad de llevar a cabo tal experiencia con tanta facilidad, pero ahora lo están haciendo —en el caso de los microorganismos— a través de algunas de las técnicas de la biología molecular. En mi opinión, los biólogos —en un futuro próximo— harán un mayor uso sistemático de la matemática para efectuar predicciones de este tipo.

Sin embargo, no hay que sobreestimar el empleo de la matemática en la predicción experimental. Si se necesita una gran dosis de simplificación para formular matemáticamente determinadas nociones, entonces es probable que estas nociones no superen la prueba de la confrontación experimental. Esto se da sobre todo en las ciencias sociales, cuyas leyes básicas no conocemos con la suficiente perfección como para llevar a cabo una formulación matemática adecuada.

La matemática no es una mera herramienta. Es más importante el hecho de que sea un lenguaje. A través de este lenguaje, los científicos pueden reconocer las relaciones que existen entre las ideas, relaciones que —de otro modo— sería difícil descubrir. Por ejemplo, las leyes del movimiento en la física newtoniana se expresaron originalmente de una forma cuya aplicación exigía una minuciosa comprensión de la geometría euclidiana, que quizá no estaba al alcance de quien no fuese el propio Newton. Durante el siglo siguiente, cuando las leyes se expresaron de una forma matemática más adecuada, utilizando el cálculo que Newton ayudó a inventar, pronto se puso de manifiesto que estas leyes contenían también las leyes de la conservación de la energía y del momento cinético, nociones cuyas implicaciones van más allá de la física newtoniana.

El hecho de que la matemática sea un lenguaje es algo especialmente importante para la creación de nuevas teorías científicas. Una teoría científica acostumbra desarrollarse por etapas. Los científicos tienen que crear la teoría basándose en parte en cosas conocidas y en parte en cosas desconocidas. Una formalización matemática de la parte de la teoría que ya se conoce otorga a los científicos una forma de pensar coherente, y sugiere

cuáles son las zonas en que la teoría está incompleta, y por lo tanto, dónde habrá que efectuar modificaciones.

En el siglo XIX, cuando Maxwell se dedicó a elaborar su teoría unificada del electromagnetismo, comenzó por un conjunto de leyes ya existentes que describían lo que se conocía acerca de las fuerzas de la electricidad y el magnetismo. Maxwell pudo mostrar —a partir de una específica formulación matemática de estas leyes— que una de ellas requería ser modificada, porque —al combinarse con las demás leyes— contradecía el principio de conservación de la carga eléctrica, de general aceptación. La ley modificada pareció extraña ante los ojos de muchos científicos de la época, por ejemplo Kelvin, pero más tarde se descubrió que era correcta.

Si en las ciencias biológicas se consiguen avances semejantes, los biólogos tendrán que abandonar la idea de que los análisis puramente teóricos —del tipo que es corriente en las ciencias físicas— poseen menos valor que las investigaciones experimentales. Es improbable que alguien que venga de fuera del campo de la biología pueda convencer a la mayoría de los biólogos de que determinada contribución matemática debida a él tenga valor para ellos. (Incluso en física, un gran respeto por la matemática no es suficiente para evitar una desconfianza generalizada hacia los matemáticos que tratan de afirmar algo relacionado con la física.) En consecuencia, es probable que sean los biólogos con formación matemática —y no los matemáticos con formación biológica— quienes apliquen con éxito la matemática a la biología. Un mayor porcentaje de biólogos jóvenes está recibiendo en la actualidad una formación matemática avanzada, y esto acabará por producir biólogos lo bastante familiarizados con la matemática para aplicar sus formas más nuevas a la comprensión de los fenómenos biológicos.

Antes de finales del siglo XIX, la necesidad de los científicos —que requerían un lenguaje adecuado para expresar sus ideas— sirvió a menudo para estimular los avances matemáticos. En este siglo, la matemática ha adquirido una vida más autónoma, y en muchos sectores ha progresado de forma independiente con respecto a la ciencia. Como consecuencia, en la actualidad existen a nuestra disposición muchas estructuras matemáticas nuevas, que podrían aplicarse a nuevas áreas científicas, aunque muchas de tales estructuras se hayan desarrollado sin pensar en dichas aplicaciones.

La mayoría de los no matemáticos piensan que las matemáticas se preocupan básicamente de los números. Sin embargo, en muchas de las estructuras más nuevas que han descubierto los matemáticos no intervienen de una manera directa los números. En cambio, hacen referencia a preguntas de este tipo: cómo pueden conectarse los objetos entre sí, qué clase de distorsiones se pueden aplicar a un espacio sin cambiar sus propiedades esenciales (tema que estudia la topología) y cuáles son las reglas combinatorias de símbolos abstractos que llevan a estructuras con propiedades interesantes (lo cual se estudia en álgebra y en lógica). En mi opinión, las futuras aplicaciones —sobre todo en las ciencias distintas de la física— surgirán en su mayoría de estas ramas no numéricas de la matemática.

En ciencias como la biología, lo que deseamos comprender no suele ser el valor numérico exacto de determinadas propiedades de un sistema, sino más bien ciertos rasgos de importancia de dicho sistema, por ejemplo, el patrón de marcas que aparecen en las plumas de un pavo real, o la serie de fases que conduce desde un huevo fecundado hasta un recién nacido. Resulta plausible que una estructura matemática no numérica se convierta en el camino adecuado para describir estas propiedades de los sistemas biológicos. Esto constituiría una aplicación de la matemática a la biología que sería mucho más profunda que las efectuadas hasta ahora.

En biología, en química y en algunas partes de la física hay fenómenos demasiado complejos como para entenderlos mediante un análisis directo de las partículas subatómicas que los componen. En tales casos las leyes de la física atómica resultan inútiles, sin que esto signifique que no podamos aspirar a comprender en absoluto dichos fenómenos. Una manera de afrontar el problema consiste en adoptar una estrategia mediante la cual formulamos leyes que describen un fenómeno, de acuerdo con un modelo que —a su vez— describe cómo ocurre el proceso que se está investigando. Esta clase de modelos no necesariamente han de deducirse de las leyes fundamentales de la física, aunque se vean condicionados por las implicaciones de las leyes físicas. Creo que será en este proceso de construcción de modelos donde las matemáticas desempeñarán su función más importante en el futuro de la ciencia.

Cada rama de la matemática posee determinadas estructuras que son específicas de ella. La rama denominada cálculo versa

sobre funciones, que pueden definirse como parejas de números relacionados entre sí, en las que un cambio en uno de los números provoca un cambio en el otro. La geometría trata acerca de las líneas, los planos y otras clases de figuras. Cuando dentro de un sector de la ciencia podemos identificar un elemento que posea una estructura matemática, los resultados ya conocidos por el matemático pueden emplearse para entender la conducta de dicho elemento. Por ejemplo, Newton logró establecer una identidad entre el movimiento de un cuerpo y una función matemática, que dependía de la cantidad de tiempo que hubiese transcurrido durante el movimiento. A continuación, Newton estuvo en condiciones de utilizar —para describir el movimiento— lo que él y otros científicos habían aprendido acerca de tales funciones. Hemos visto ya que, en época más reciente, los físicos han descubierto que las simetrías que se dan en las partículas subatómicas pueden considerarse como elementos pertenecientes a lo que los matemáticos denominan un grupo. Cuando se llevó a cabo este descubrimiento, se hizo posible utilizar algunas de las ideas de las teorías de grupos para encontrar relaciones entre las propiedades de estas partículas. El hecho de que se compruebe que estas nuevas relaciones son correctas sirve para confirmar la idea de que resulta natural describir estas partículas empleando los grupos. En mi opinión, es probable que en otras ramas de la ciencia también se descubran esta clase de descripciones naturales, lo cual permitirá comprender mejor fenómenos que en la actualidad parecen poseer una enorme complejidad.

No siempre da resultado esta búsqueda de estructuras matemáticas. En el siglo XVI, Kepler sugirió que las órbitas de los seis planetas más cercanos al Sol podían identificarse con determinadas construcciones geométricas en las que intervenían los cinco sólidos regulares de la geometría euclidiana. Tal sugerencia no pudo sobrevivir a la obtención de datos más precisos acerca de las órbitas planetarias (que el propio Kepler ayudó a suministrar). Un ejemplo más reciente, que quizá tenga más éxito, fue el descubrimiento realizado por los matemáticos de que sólo existen tres tipos de espacio cuya curvatura sea la misma en todas partes (fig. 21). La cosmología del siglo XX ha aplicado esta idea a la estructura global del Universo, y la observación empírica acabará por indicarnos cuál de estos tres tipos de espacio habitamos nosotros, si es que habitamos alguno de ellos.

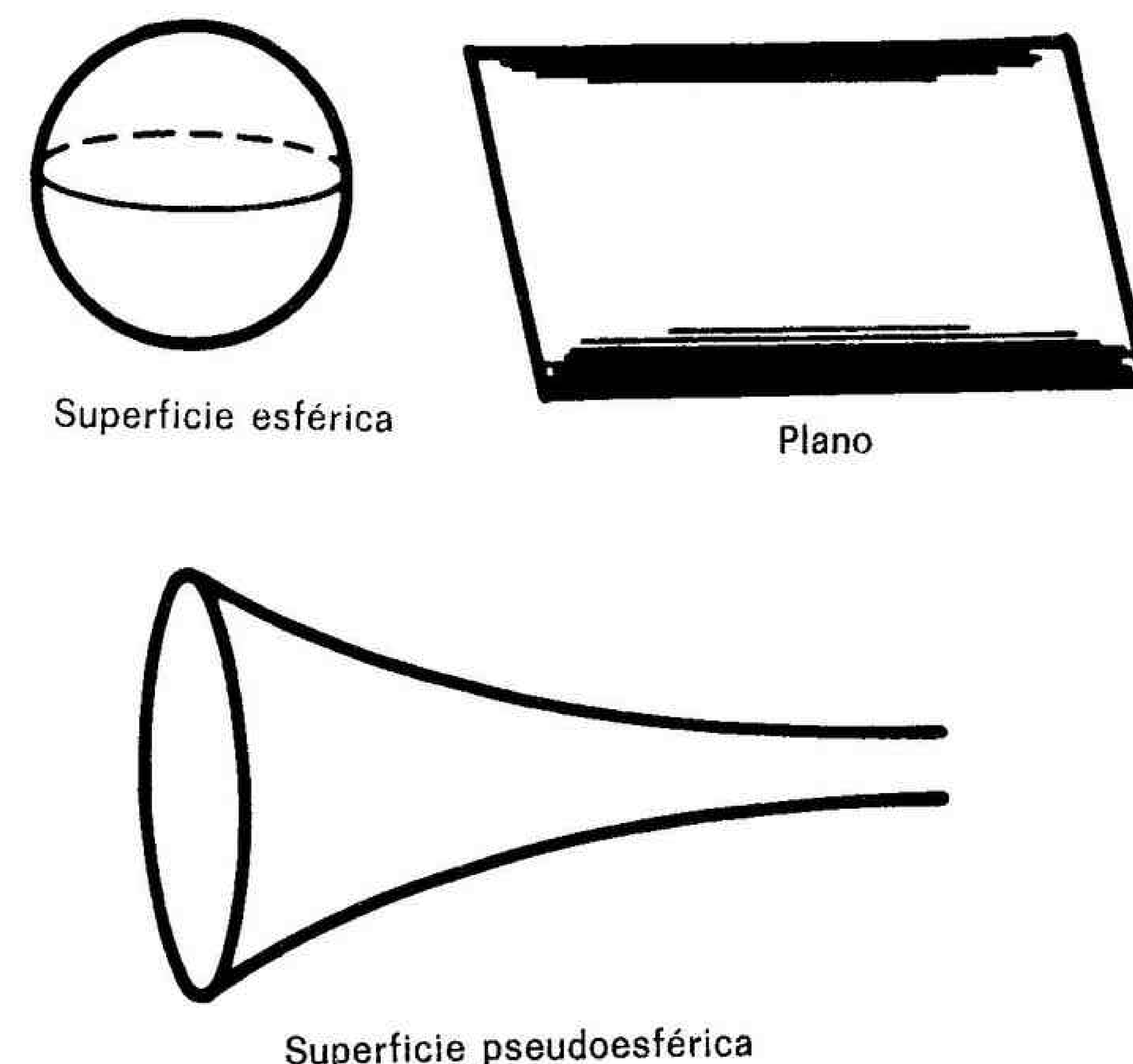


Fig. 21. Espacios de curvatura constante. Existen tres tipos de espacio matemático cuya curvatura es la misma en todos sus puntos. Representados en dos dimensiones, se trata de la superficie de una esfera con una curvatura positiva, de un plano, cuya curvatura es igual a cero, y de una pseudoesfera, cuya curvatura es negativa.

LA DESCRIPCIÓN DEL CAMBIO

Hace poco se ha llevado a cabo un intento muy interesante de encontrar una descripción matemática natural que se aplicase a los fenómenos pertenecientes a los diversos campos de la ciencia. René Thom es un eminente matemático francés que ha efectuado importantes aportaciones a una rama de la matemática que se conoce con el nombre de teoría de las catástrofes. La teoría de las catástrofes estudia las propiedades matemáticas de ciertas modalidades de cambio discontinuo («catástrofes»). Por ejemplo, la ebullición del agua —que ocurre de manera sú-

bita cuando la temperatura alcanza los 100 °C a nivel del mar— manifiesta este cambio discontinuo (fig. 22).

Thom ha propuesto que algunos de los tipos de cambio discontinuo que se estudian en la teoría de las catástrofes se identifican con ciertos aspectos de la morfogénesis del desarrollo embrionario de los organismos multicelulares. En el capítulo 4 vimos que uno de los problemas más relevantes de la biología consiste en la comprensión del desarrollo. Uno de los ingredientes esenciales que se necesitan para solucionar este problema es una adecuada imagen del desarrollo; sin tal descripción, los numerosos hechos que la experimentación nos revela acerca del desarrollo no formarán un patrón coherente. Es posible que, algún día, la imagen correcta se exprese en el lenguaje científico tradicional, como sucede en el caso de la imagen física que se

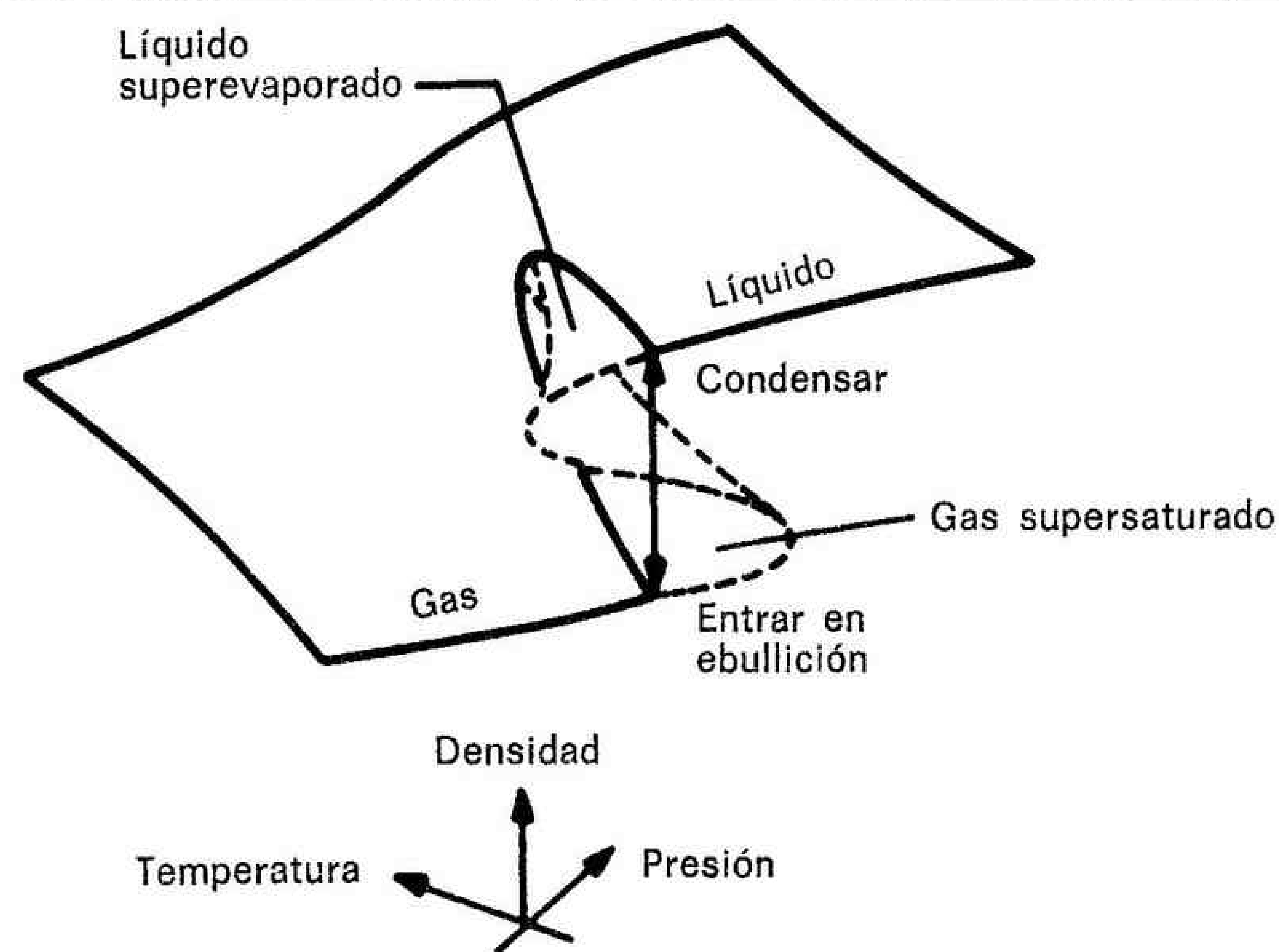


Fig. 22. Uno de los tipos de catástrofes. La densidad de una sustancia puede variar de manera continuada a medida que su temperatura cambia, siguiendo la superficie lisa. Para ciertas gamas de temperaturas, pueden existir dos valores de la densidad, y la sustancia puede pasar bruscamente de un valor a otro (en el fenómeno de la ebullición o la condensación), tal como indica la flecha de dos puntas.

utiliza en biología molecular. Sin embargo, creo que es más probable que la creatividad de algún matemático suministre alguna clave para desvelar los secretos del desarrollo, y que esto constituirá un gran triunfo científico.

Thom y sus colegas están siguiendo el camino abierto por las ideas que formuló el biólogo británico D'Arcy Thompson, a principios del siglo XX. En vez de centrarse en los mecanismos bioquímicos a través de los cuales tiene lugar el desarrollo, estos matemáticos tratan de entender la morfogénesis utilizando las consecuencias que se desprenden del hecho de que los seres vivientes se desarrollan en un espacio tridimensional con unas propiedades geométricas y topológicas específicas. Thom no afirma que la bioquímica no dicte la forma en que se produce la morfogénesis, sino más bien que es posible entender ciertos aspectos de la morfogénesis —y encontrar un lenguaje natural que sirva para describirlos— sin conocer los detalles biológicos. Esto se asemeja al hecho de que se puede comprender un programa de computador sin entender la física del estado sólido y la electrónica que rige en la práctica el funcionamiento de los componentes del computador.

El intento de aplicar la teoría de las catástrofes al desarrollo embrionario es sólo parte de un programa muy ambicioso. Thom está tratando de construir una descripción completa de las formas y del modo en que cambian a lo largo del tiempo. Thom entiende por «forma» cualquier objeto que parezca estable ante la percepción humana, sobre todo aquellos que existen en el mundo macroscópico. Las mesas, los organismos vivos o los planetas son ejemplos de formas. Entre éstas se incluyen la mayoría de los objetos de interés para la ciencia, con la posible excepción de las partículas subatómicas. En este proyecto general —al igual que en su específica aplicación al desarrollo— Thom basa su comprensión de las propiedades de las formas en el hecho de que existen en un espacio-tiempo tetradimensional. Una de las principales consecuencias de la teoría de las catástrofes —el hecho de que sólo puede existir una cantidad reducida de tipos distintos de cambio discontinuo— está causada por las propiedades geométricas del espacio *tri*-dimensional. Si el espacio tuviese una cantidad diferente de dimensiones, se darían diferentes tipos de cambios.

Hace mucho tiempo que se conocen ejemplos más sencillos de las consecuencias propias de la geometría de un espacio de

tres dimensiones. La geometría del espacio nos enseña que, entre todos los objetos que tengan un mismo volumen, la esfera es la que tiene una superficie menor. Por esta razón en la naturaleza hay muchos objetos que tienen formas esféricas, sea cual fuere el material del que estén hechos, porque los procesos físicos que rigen su forma funcionan en el sentido de reducir al mínimo su superficie.

Lo que propone Thom es algo análogo a la rama de la física que recibe el nombre de termodinámica, que describe aquellos aspectos del comportamiento de la materia que no dependen de la composición de ésta. Por ejemplo, hay muchos gases que al expandirse se enfrían de la misma forma. Thom ha utilizado algunos descubrimientos de la matemática moderna para describir una amplia variedad de fenómenos distintos en los que intervienen formas, y el modo en que cambian. Este autor cree que estos fenómenos pueden entenderse de manera cualitativa, con base en los principios generales de la teoría de las catástrofes. Una de las cosas que Thom intenta explicar es por qué existen formas, lo cual constituye lo que él denomina el problema de la estabilidad estructural. Aún es demasiado pronto para determinar el éxito de su programa. Muchos matemáticos y científicos se oponen a sus pretensiones. Sin embargo, estoy convencido de que —sea cual fuere el destino de la teoría de las catástrofes— es probable que siga vigente la propuesta de Thom según la cual la conducta de los objetos es una consecuencia de relaciones matemáticas universales, y que esto proporcione importantes perspectivas a los científicos del futuro.

Hay otros sectores de la ciencia en los que tales ideas probablemente pueden dar fruto. Uno de los interrogantes importantes acerca de las proteínas es la forma como se estructuran por sí mismas en tres dimensiones. Esta disposición estructural es algo decisivo para el funcionamiento de las proteínas como catalizadores de las reacciones químicas, y para las funciones de anticuerpo que desempeñan un importante papel en el sistema inmunológico. Parece probable que la disposición estructural de las proteínas se halle notablemente condicionada por los principios generales que rigen el modo en que las cosas se conectan en un espacio tridimensional, y que muchos de los detalles de esta estructuración no dependen de la bioquímica de la proteína. Si esto es así, un estudio matemático de las posibles maneras en que los polímeros largos pueden autoestructurarse en disposiciones tridimensionales arrojaría mucha luz sobre cómo funcionan las proteínas, sobre por qué las proteínas son las moléculas preferidas para la actividad catalizadora en los seres vivos de la Tierra, y sobre si moléculas alternativas u otras estructuras podrían llevar a cabo funciones catalizadoras semejantes en condiciones diferentes.

EL ORIGEN DE LA COMPLEJIDAD

La mayor parte de la materia que nos es familiar consiste en combinaciones atómicas y moleculares de neutrones, protones y electrones. Las complejas estructuras internas de los neutrones y los protones son irrelevantes para la mayoría de las propiedades de la materia que son conocidas por nosotros, al igual que la estructura interna de los ladrillos posee escasa importancia para determinar la efectividad de éstos con respecto a la edificación de una casa. Además, dentro de las condiciones que se dan en la materia corriente, las ecuaciones básicas de la teoría cuántica —que describen el comportamiento de los elementos constituyentes de la materia— son relativamente sencillas. No hay motivos para pensar que, en condiciones ordinarias, en el futuro habrá que modificar estas sencillas ecuaciones.

Sin embargo, a pesar de que los elementos constituyentes de la materia están regidos por estructuras y leyes sencillas, los objetos de grandes dimensiones a menudo manifiestan un comportamiento complejo, cuya explicación no resulta intuitivamente manifiesta. Esto es así sobre todo en aquellos sistemas que contienen muchos átomos u otros componentes que influyen con fuerza entre sí. Los líquidos en movimiento, los organismos multicelulares, los fotones de una cavidad de láser y las neuronas del cerebro son ejemplos de esta clase de sistemas.

Es difícil que la mente humana pueda clasificar y comprender todos los tipos diferentes de complejidad que se producen en los grandes sistemas. No obstante, los avances en matemáticas aplicadas y en análisis informático nos brindan ciertas perspectivas de comprensión con respecto a dos tipos de complejidad. Estos dos tipos suelen considerarse como opuestos, y se denominan «caos» y «orden». Sin embargo, hay indicios de que ciertos tipos de caos y de orden son consecuencia del mismo tipo de estructura matemática, las ecuaciones no lineales. Quizás

esto sea una versión moderna de la antigua creencia filosófica del filósofo griego Anaxágoras, que pensaba que los opuestos surgen de un Absoluto carente de forma, y que finalmente acaban por regresar a él.

EL CAOS

Incluso en los sistemas de grandes dimensiones (donde la teoría cuántica no desempeña un papel relevante), el comportamiento de dichos sistemas a menudo resulta imprevisible y está sujeto a grandes variaciones como consecuencia de lo que parecen ser cambios secundarios dentro del sistema. Esto recibe el nombre de «comportamiento caótico». Por ejemplo, un líquido puede fluir de manera regular y previsible dentro de cierta gama de velocidades, pero volverse turbulento cuando la velocidad aumenta ligeramente. Esta clase de comportamiento al azar hace recordar las palabras de Pierre Laplace, matemático francés del siglo XIX, cuando afirmaba que, si conociésemos suficientemente bien el presente, estaríamos en condiciones de predecir con exactitud el futuro.

El comportamiento caótico *no puede* predecirse, aunque las ecuaciones fundamentales tengan un carácter determinista, como las de la física de Newton. A mediados del siglo pasado Maxwell señaló que ciertos fenómenos —si bien están regidos por ecuaciones deterministas— son a pesar de todo imprevisibles en la práctica, porque la forma en que se desarrollen dependen de manera decisiva de la situación específica que exista al comienzo de su desarrollo. Como nuestras mediciones siempre son imperfectas, no poseemos un conocimiento perfecto acerca de las condiciones que describen un sistema determinado. En los sistemas que manifiestan un comportamiento caótico, el más pequeño error que aparezca en nuestro conocimiento acerca de su estado cuando empezamos a estudiarlos nos conducirá muy pronto a una incertidumbre total con respecto a sus condiciones reales.

El caos no es universal en los fenómenos de cada día, pero es importante comprender cuándo y cómo surge, y comprender con exactitud cuáles son los elementos que intervienen en él. Se ha descubierto que el caos puede ser estudiado en situaciones que sirvan como modelo, cuando las ecuaciones son lo bastante

sencillas como para ser examinadas de forma muy detallada. Quizás este enfoque conteste dentro de poco a nuestros interrogantes acerca del caos. Es posible que no podamos predecir con exactitud el tiempo que hará la semana que viene, pero sabremos por qué no podemos predecirlo.

Los modelos de sistemas físicos que nos ayudan a entender el caos implican el uso de ecuaciones no lineales, que descubren cómo cambian a lo largo del tiempo una cantidad o varias cantidades en interacción. El rasgo principal de estas ecuaciones no lineales es que las cantidades que aparecen en ellas varían a lo largo del tiempo de una forma que depende básicamente de su volumen. En una ecuación no lineal, si multiplicamos por dos la cantidad originalmente presente, la cifra que haya en un momento posterior no será exactamente el doble, sino que cambiará de un modo complejo. Las ecuaciones no lineales —en sí mismas— son deterministas, lo cual significa que, si sabemos *con precisión* cuál es la cantidad que existe al principio, el volumen que haya en cualquier momento posterior también puede fijarse exactamente mediante las ecuaciones. Esto constituía el comportamiento normal de los sistemas físicos en la física precuántica, y le sirvió de inspiración a Laplace.

Los estudios más recientes han puesto de relieve que un sistema cuyo cambio está regido por una ecuación no lineal puede manifestar varios comportamientos distintos desde un punto de vista cualitativo, según sean los valores numéricos de determinadas magnitudes —llamadas parámetros— que aparecen en las ecuaciones. Una de estas magnitudes, por ejemplo, puede representar el grado en que la ecuación sea no lineal. Para determinados valores del parámetro, la evolución del sistema es regular, como un planeta que describe una órbita alrededor del Sol, y por lo tanto resulta previsible. Sin embargo, un cambio en los parámetros que definen la ecuación hace que el sistema manifieste un comportamiento completamente diferente. En vez de seguir una órbita regular, el objeto recorrerá un complicado camino a través de sus posibles situaciones, adquiriendo quizá todos los valores imaginables, sin volver a su configuración original. Cuál de estos muchos caminos posibles vaya a seguir el sistema depende de manera decisiva de su configuración inicial. Un pequeño cambio de tal configuración puede hacer que se interne por caminos completamente distintos. En esto consiste el comportamiento caótico.

A veces el sistema acaba por regresar a un comportamiento regular después de un largo período de caos. Existen otros casos —basados también en ecuaciones deterministas— en los cuales el auténtico carácter aleatorio puede darse en el movimiento, de manera que nunca vuelva a convertirse en regular. Por el contrario, el movimiento quizá llegue a confinarse por sí mismo en una región del espacio cuyas dimensiones son algo intermedio entre una superficie y un volumen. Esta dimensionalidad peculiar —que el matemático B. Mandelbrot ha denominado fractal— parece formar parte de numerosos fenómenos científicos, por ejemplo, las transiciones de fase. Los fractales pueden llegar a ser un tema importante en la matemática aplicada del futuro.

Es inevitable plantearse si el caos que así surja del orden constituye la regla en todos aquellos casos en que se dé una aleatoriedad. Es probable que esto sea así en aquellas situaciones que se rigen por la física precuántica, por ejemplo el flujo turbulento de un líquido. El caos también puede estar relacionado con el problema de la dirección del tiempo, que se expuso en el capítulo 3, al hablar de por qué el orden tendía espontáneamente a disminuir. Los sistemas cuyo orden haya disminuido pueden ser aquellos cuyos átomos están sometidos a movimientos caóticos que hacen que desaparezca rápidamente el orden microscópico presente en un primer momento. Interrogantes como éste formarán una importante área de estudio y de experimentación para los físicos y para los matemáticos del futuro.

Cabe la tentación de pensar que incluso la aleatoriedad inherente a la teoría cuántica es en la práctica una manifestación caótica del determinismo subyacente. Ha habido cierta reflexión en torno a estas ideas, pero en ningún caso ha servido para efectuar nuevas indicaciones acerca de fenómenos observables. Además, aunque la aleatoriedad de la teoría cuántica resulte ser efectivamente el tipo de caos determinista que se produce como resultado de una ecuación no lineal, no nos permitiría efectuar predicciones acerca de los fenómenos atómicos, que sean más exactas que las permitidas por el auténtico azar que se integra en las ecuaciones. A pesar de todo, tal descubrimiento sería de una gran importancia, porque modificaría considerablemente nuestra visión acerca de cómo se introduce la aleatoriedad en la naturaleza.

EL ORDEN

Paradójicamente, el orden puede aparecer gracias a la destrucción de una sencillez subyacente en la que no existía un orden aparente. El problema que estamos analizando ahora —cómo surge el orden en los sistemas físicos— es distinto del que se planteaba cuando examinábamos la dirección del tiempo. En un sistema aislado es empíricamente cierto que el orden no puede aumentar (ley del aumento de la entropía), pero los sistemas que estudiaremos ahora se hallan en contacto con un medio ambiente con el cual pueden intercambiar materia y energía. En tales circunstancias, nada impide un aumento del orden, y en muchos casos esto es lo que sucede. Es preciso comprender los mecanismos a través de los cuales surge el orden en estas circunstancias, y los rasgos generales de dicho orden.

En cierto sentido el orden es lo opuesto al caos, pero a pesar de todo existen parecidos en la forma en que ambos tienen lugar dentro de los sistemas físicos. En ambos casos, a menudo se constata que hay un cambio repentino de una situación a la otra. En uno de los lados del cambio se produce un comportamiento radicalmente distinto al que se produce en el otro lado. Es algo análogo a los cambios de fase examinados en el capítulo 1. Por ejemplo, cuando comienza a funcionar un láser, la luz de su cavidad cambia bruscamente desde una mezcla con muchas longitudes de onda hasta una sola longitud predominante. Este comportamiento es semejante al que ocurre cuando un trozo de hierro queda imantado. En este proceso se produce un cambio rápido en la dirección del gran número de imanes atómicos que componen el trozo de hierro. Antes de la imantación, estas direcciones están dispuestas al azar; después, son casi todas iguales. La aparición del orden se acostumbra advertir a través de un cambio de esta clase en las propiedades globales del sistema, y no en la disposición de sus constituyentes microscópicos.

Nuestra comprensión se vería ayudada por el hecho de encontrar reglas generales que describan la aparición del orden en muchos procesos físicos diferentes, por ejemplo, en el funcionamiento de un láser o la imantación del hierro que se acaba de describir. Aunque los procesos específicos que tienen lugar son

muy distintos, podría ocurrir que las ecuaciones matemáticas que los describen sean semejantes. Conocemos casos de fenómenos cuyos elementos constitutivos son distintos, pero que pueden ser descritos por ecuaciones semejantes. Las ondas sonoras en el aire y las ondas luminosas en el vacío se ajustan a las mismas ecuaciones, aunque en un caso éstas describan átomos en movimiento, y en el otro, campos electromagnéticos.

Se ha descubierto que diversos cambios desde el desorden al orden pueden describirse como consecuencia de un tipo particular de estructura matemática, las ecuaciones diferenciales no lineales. Éstos son semejantes a las ecuaciones mencionadas en conexión con la conducta caótica. También en este caso la característica principal de tales ecuaciones es que la forma en que las cantidades descritas por las ecuaciones varía a lo largo del tiempo es muy sensible a la cantidad de la cual se trate. Esto se distingue de las ecuaciones diferenciales lineales, que describen fenómenos como las ondas sonoras, en los que la tasa de cambio de las diversas cantidades es menos dependiente de lo que ya esté allí.

Algunas de las soluciones a estas ecuaciones no lineales describen situaciones en las que surge el orden. La forma que adopte una solución puede depender decisivamente del valor de determinados parámetros que aparecen en las ecuaciones. Por ejemplo, uno de los parámetros de las ecuaciones que describen la imantación es la temperatura del imán. A menudo ocurre que, cuando el parámetro pertenece a determinada gama numérica —que corresponda, por ejemplo, a las temperaturas elevadas— las soluciones individuales a las ecuaciones resultan simétricas. Describen una situación en la que hay cantidades iguales de imanes atómicos que señalan en una dirección del espacio. Para una diferente gama de valores del parámetro, correspondiente a temperaturas bajas, las soluciones individuales quizá no posean esta propiedad, y algunas de las direcciones de los imanes atómicos resultan más frecuentes que otras. Esto ocurre aunque las ecuaciones por sí mismas no favorezcan una dirección más bien que otra.

El cambio en la forma de las soluciones a menudo señala la aparición del orden dentro del sistema. En un imán de hierro no se produce una imantación general cuando la temperatura es elevada, porque los efectos magnéticos de los átomos individuales se anulan entre sí. A bajas temperaturas, estos imanes atómicos se alinean a la perfección, y queda magnetizado todo el imán. Los fenómenos físicos que se produzcan dentro del imán o cerca de él dependen ahora de la dirección, de un modo distinto al que se daba en el caso de la temperatura elevada. Por ejemplo, si una aguja de brújula se aproxima al imán alineado, la aguja girará hacia éste, lo cual no sucedería cuando los imanes atómicos individuales señalan en direcciones distribuidas al azar.

La situación en la que las soluciones de un conjunto de ecuaciones tienen menos simetría que las ecuaciones mismas es semejante a la situación de los campos cuánticos, expuesta en el capítulo 1. Los campos también son descritos por un tipo de ecuación no lineal, y se produce una ruptura de la simetría cuando un parámetro de la secuencia corresponde a determinada gama numérica.

A veces aparece otro rasgo cualitativo cuando se examinan juntas varias ecuaciones no lineales. Tal sistema de ecuaciones es pertinente cuando se requieren diferentes cantidades para describir el sistema, por ejemplo, cuando en una solución hay concentraciones de varias moléculas diferentes en interacción, o cuando hay fotones con diversas longitudes de onda, como en una cavidad de láser. La luz del láser comienza como una mezcla de longitudes de onda, pero la competición descrita por la ecuación puede causar rápidamente el crecimiento en una sola longitud de onda, mientras las demás desaparecen. Esto constituye una reminiscencia de cómo ciertos biólogos interpretan la idea darviniana de evolución a través de la selección natural. La solución a la ecuación que venza en la competencia depende precisamente de las condiciones iniciales y del entorno, al mismo tiempo. En muy poco tiempo, sin embargo, una de las soluciones predominará en una amplia diversidad de condiciones; esto constituye una propiedad de las ecuaciones en sí mismas, propiedad que es compartida por las ecuaciones no lineales que describen una variedad de fenómenos distintos.

El estudio matemático de la conducta compleja acaba de empezar, pero ya ha iluminado numerosas áreas oscuras de la ciencia. Quizás el resultado más contundente será una clasificación general de los tipos de complejidad, por ejemplo, el caos, junto con la demostración de que una cantidad relativamente pequeña de estos tipos —cuando se combinan adecuadamente— puede dar razón de una amplia diversidad de conductas

dentro de sistemas a gran escala. Me estoy refiriendo a algo análogo a lo ocurrido en los siglos XVI y XVII, cuando Galileo, Newton y otros científicos analizaron el movimiento correctamente por primera vez. Antes no se sabía con claridad cuántos tipos de movimiento había en la naturaleza, o qué relaciones existían entre ellos. A través de estos análisis, se estableció que la clave residía en el cálculo, rama de la matemática que en aquella época se acababa de crear. Mediante el cálculo se hacía posible determinar todas las formas del movimiento; a través de la adecuada combinación de unas cuantas de las formas más sencillas de movimiento, pueden describirse la mayoría de los tipos de movimiento observados en la naturaleza. En el caso de la complejidad, podríamos aprender algo parecido gracias al estudio matemático de los tipos de ecuaciones que llevan al orden y al caos. Si de ello surge una descripción general de la complejidad, será un importante ejemplo sobre cómo los avances matemáticos pueden permitir el progreso de la ciencia.

NUEVAS DESCRIPCIONES DEL ESPACIO-TIEMPO

A veces una estructura matemática específica nos revela un aspecto completamente nuevo de un fenómeno natural. Esto sucedió al descubrirse la geometría no euclidiana como estructura matemática independiente en el siglo XIX. Más adelante, Einstein se dio cuenta de que esta geometría era válida en nuestro propio espacio-tiempo. Quizás el aspecto más chocante de este descubrimiento sea la posibilidad de que nuestro Universo sea finito, y se parezca a la superficie de una esfera más que a un plano euclidiano, pero con una dimensión más.

Envalentonados por el éxito de Einstein, en las décadas de 1920 y 1930 muchos matemáticos y físicos trataron de utilizar otras estructuras matemáticas para describir la naturaleza, pero sin obtener resultados significativos. Debido a este fracaso, el empleo de estructuras matemáticas abstractas en la ciencia física se transformó durante muchos años en aspecto marginal. Esta situación ha cambiado no hace mucho, como consecuencia del éxito de la teoría de grupos en la física de las partículas, y gracias a los esfuerzos de eminentes científicos que trabajan en el campo de la relatividad general, para expandir el empleo de la nueva matemática. Quizá la matemática que utilizamos para describir los objetos en el espacio y el tiempo —que procede de nuestra experiencia sobre los objetos cotidianos— no sea la más adecuada para las partículas subatómicas o para el Cosmos. El uso de otros lenguajes matemáticos podría servir para contestar algunas preguntas en estos campos.

El astrofísico matemático británico Roger Penrose y sus colaboradores han dado un paso en esta dirección. Esperan hallar una sustitución de la descripción convencional del espacio-tiempo que se utiliza en todas las teorías físicas, según la cual cada acontecimiento ocurre en un punto descrito por cuatro números reales: las tres coordenadas espaciales y una coordenada temporal de dicho punto. Penrose y sus colegas describen dónde y cómo ocurren los acontecimientos mediante un nuevo tipo de estructura matemática, a la que llaman *twistor*. Un *twistor* consta de dos conjuntos de números complejos. Cada número complejo consiste en un número real y en un número imaginario. Existe una complicada relación entre los números complejos del *twistor* que corresponden a un acontecimiento, y las coordenadas espaciotemporales de dicho acontecimiento. En realidad, los *twistors* corresponden más a conjuntos de puntos cuyas coordenadas son números complejos, y no números reales. Puede considerarse que el conjunto de puntos sigue la trayectoria de una partícula que se mueve a la velocidad de la luz a través del espacio-tiempo. En lugar de pensar que el espacio-tiempo está constituido por una cantidad infinita de puntos, como en la descripción acostumbrada, la descripción basada en el *twistor* representa el espacio-tiempo como construido a partir de una cantidad infinita de trayectorias entrecruzadas.

Roger Penrose ha afirmado muchas ideas acerca de lo que nos va a permitir el empleo de la descripción basada en el *twistor*. Una de dichas ideas es que, como nuestra habitual descripción del espacio-tiempo es un concepto derivado y no fundamental, algunas de sus propiedades específicas —por ejemplo, la cantidad precisa de dimensiones— podrían deducirse de las propiedades de los *twistors*. En otras palabras, empezando con los *twistors*, podríamos reconstruir un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, pero no un espacio-tiempo con una cantidad diferente de dimensiones. Penrose cree también que la descripción basada en el *twistor* forma un nexo más natural entre la teoría de la relatividad especial y la teoría cuántica, en comparación con la acostumbrada teoría cuántica de los campos. Este cien-

tífico sugiere que, al establecer un nexo de esta clase, la habitual descripción espaciotemporal se convertirá en mera aproximación, y que algunas de las dificultades que surgen en la teoría del campo cuántico (por ejemplo, la aparición de valores infinitos para determinadas cantidades) se podrán evitar gracias a la descripción de la interacción entre partículas, efectuada con base en el *twistor*. Tales esperanzas aún no se han llevado a la práctica.

Si la descripción que emplea la noción *twistor* acaba por ser válida en la naturaleza, puede llegar a tener otras consecuencias de largo alcance. Los campos cuánticos se ponen de manifiesto de formas distintas a las partículas subatómicas, y por eso es probable que la descripción basada en el *twistor* contenga estructuras que describen fenómenos distintos a las partículas subatómicas. Por ejemplo, la teoría del *twistor* podría implicar una conexión entre las diversas regiones del espacio-tiempo más detallada que la habitual descripción tetradimensional de un punto. Esto resulta plausible porque los *twistors* corresponden a trayectorias que unen puntos pertenecientes a regiones muy separadas. Si esto es así, serviría para arrojar luz sobre un problema de la cosmología actual. Según la descripción acostumbrada, no debería existir la más mínima relación entre las propiedades de la materia en regiones que están muy alejadas en el espacio, pero cercanas en el tiempo. No obstante, gracias a la observación de la luz procedente de galaxias distantes que se encuentren en direcciones opuestas en el cielo, existen datos convincentes acerca de la semejanza de las condiciones en dichas regiones. Por ejemplo, la proporción entre la masa del electrón y la masa del protón —que en principio podría variar entre uno y otro lugar— es la misma, y con alto grado de exactitud, en regiones que se hallan muy alejadas. Lo desconcertante es por qué ocurre tal cosa. La cosmología inflacionista de Alan Guth da una respuesta a esta pregunta, al suponer que todas las regiones de esta clase que podemos observar ahora estaban en contacto muy estrecho en el Universo inicial. Sin embargo, quizás ésta no sea la razón correcta. Si los *twistors* proporcionan una descripción de los acontecimientos que resulte más fundamental que los puntos del espacio-tiempo, quizás ayuden a solucionar este rompecabezas, entre otros.

Si los *twistors* nos ofrecen una descripción más fundamental del Universo, de la cual la descripción basada en coordenadas espaciotemporales es únicamente una aproximación, entonces hay razones para examinar todas las estructuras que aparecen naturalmente dentro de la descripción basada en el *twistor*, para comprobar cuáles de ellas se corresponden con otros aspectos desconocidos de la naturaleza. Para lograrlo, los fisicomatemáticos harán uso de algunas ramas de la matemática que se superponen con la descripción basada en el *twistor*, por ejemplo, la topología, pero que han desempeñado un papel muy reducido —hasta el momento— en la física convencional.

Esta área de la matemática puede desempeñar una función importante en la ciencia futura, aun en el caso de que los *twistors* resulten ser irrelevantes. En el capítulo 3 se dijo que no sabíamos cómo se conectaba el espacio-tiempo a distancias y tiempos muy pequeños. Esta laguna en nuestros conocimientos se acentúa debido a una noción que surge al combinar la teoría cuántica y la relatividad general, como ha señalado el físico teórico norteamericano John Wheeler.

En una teoría del campo cuántico, los campos se someten a un proceso conocido con el nombre de «fluctuaciones en el vacío». Se trata de otra manifestación del principio de incertidumbre; en este caso se aplica a las fuerzas de campo y no a las posiciones de las partículas. Debido a las fluctuaciones en el vacío, la fuerza de un campo —por ejemplo, el campo eléctrico— cambia rápidamente en cualquier región del espacio, sobre todo en intervalos cortos de tiempo. En una versión cuántica de la teoría de la relatividad general —que aún no se ha elaborado— se producirían fluctuaciones en el campo gravitatorio. Esto significaría que las propiedades del espacio y el tiempo en sí mismas se someterían a tales fluctuaciones. Una región del espacio que sea plana en un instante puede transformarse en curva al instante siguiente.

Estas fluctuaciones en el espacio-tiempo incluyen la manera en que las regiones se conectan entre sí. Una fluctuación en el vacío puede convertir una pequeña región perfectamente conectada —por ejemplo, la superficie de una esfera— en dos regiones desconectadas: dos esferas, por ejemplo. Cuando se visualiza a una escala lo bastante pequeña (10^{-33} centímetros) es probable que la estructura del espacio-tiempo sea extremadamente complicada. Podría parecer como una especie de líquido que hace espuma porque su movimiento ha producido muchas burbujas de aire. Quizás esta estructura surja a causa de las fluc-

tuaciones en el vacío, o es posible que el espacio-tiempo posea una estructura intrínsecamente complicada. En cualquier caso, la forma en que el espacio-tiempo se conecta en regiones muy pequeñas probablemente tenga implicaciones importantes para la física de las partículas y para la descripción de los agujeros negros. En ambos casos, muchos de los problemas no solucionados versan sobre qué es lo que sucede en las separaciones espaciotemporales reducidas. Hemos visto que cabe resolver estos problemas sin suponer que los puntos del espacio-tiempo se hallan conectados de una forma complicada, en el caso de que el espacio-tiempo sea discreto, por ejemplo. A pesar de todo, conviene que los científicos examinen enfoques que se refieran a nuevas formas de conexión del espacio-tiempo.

Una descripción exacta de cómo se conectará el espacio y el tiempo exigirá unas técnicas matemáticas más abstractas y poderosas que las que hasta ahora se han utilizado en la ciencia física. Los matemáticos que trabajan en el campo de la topología han estudiado cómo describir «espacios» abstractos con complicadas estructuras conectivas. No sé si será posible aplicar lo que ellos saben ya, o si serán necesarios nuevos avances matemáticos. Sin embargo, es muy probable que el desarrollo y la aplicación de una representación matemática adecuada para describir la estructura a pequeña escala del espacio-tiempo sea uno de los problemas dentro de la física matemática del futuro.

Las nociones de conectividad y de topología pueden desempeñar otros papeles importantes en la física del futuro. La teoría cuántica explica la «cuantización del espín», es decir, el hecho de que el espín puede asumir únicamente ciertos valores determinados, cuyas proporciones sean números racionales simples. Esto se explica apelando a las propiedades matemáticas de las rotaciones en el espacio. En época reciente se ha explicado el hecho de que las cargas eléctricas de las partículas subatómicas estén cuantizadas, utilizando un razonamiento semejante, basado en las propiedades matemáticas del grupo de simetría interna que describe las partículas fundamentales. Varias generaciones de físicos han llegado a considerar tales argumentos como una explicación natural de la cuantización y de los valores numéricos específicos que posea la propiedad cuantizada. Sin embargo, apenas estamos comenzando a darnos cuenta de que estos argumentos también implican sutiles suposiciones topológicas, que no siempre podrían cumplirse.

Cabe imaginar que en determinadas circunstancias no se apliquen estas suposiciones topológicas adicionales, debido a las peculiares conectividades del espacio-tiempo, y también pueden darse casos en que no sean verdaderas las conclusiones habituales acerca de la cuantización del espín y de la carga. Quizás algún día descubramos objetos con una carga eléctrica o un espín que sean imposibles de acuerdo con los criterios estandarizados. Anticiparse a esto sería una consecuencia espectacular de la aplicación de la topología a la física.

¿POR QUÉ SE PUEDE APLICAR LA MATEMÁTICA A LA CIENCIA?

¿Por qué es eficaz la matemática dentro de la ciencia? Es decir, ¿por qué podemos describir fenómenos naturales a través del uso de conceptos que originalmente han sido diseñados por matemáticos? La pregunta acerca de la efectividad de la matemática es especialmente desconcertante cuando se utilizan conceptos matemáticos «prefabricados» —grupos, por ejemplo— que originariamente no fueron inventados con el propósito de aplicarlos a la ciencia. A veces los científicos explican su área de estudio empleando métodos que más tarde hay que poner en tela de juicio. En el siglo XVIII hubo un largo período en el que los científicos utilizaban argumentos teológicos para extraer conclusiones acerca de las leyes físicas. (Irónicamente, a menudo llegaban a conclusiones correctas basándose en argumentos que actualmente consideraríamos irrelevantes.) Aunque la matemática ha sido utilizada con éxito aparente en la ciencia durante siglos, deberíamos examinar la posibilidad de que no exista una conexión real entre ambas, y que las matemáticas no continúen siendo utilizadas en la ciencia del futuro.

Creo, sin embargo, que la noción según la cual la matemática es realmente irrelevante para la ciencia, o será menos relevante en el futuro, no puede defenderse con éxito. Es difícil imaginarse a la ciencia sin el empleo sistemático de representaciones simbólicas, y el análisis de sistemas simbólicos constituye la esencia de la matemática. Esto es especialmente cierto en campos como la física, donde los aspectos de la naturaleza actualmente en estudio se hallan menos sujetos a la intuición ordinaria, y donde el uso de la representación simbólica resulta

esencial. Sin embargo, es probable que el razonamiento matemático se convierta en esencial también en otros campos, sobre todo en la medida en que «tomen prestadas» ideas y aplicaciones procedentes de la física.

Necesitamos entender por qué la matemática funciona dentro de la ciencia. Un enfoque de esta pregunta podría ponerse en conexión con la visión platónica de la naturaleza de la matemática, que ha sido defendida por algunos matemáticos y filósofos, Kurt Gödel, por ejemplo. De acuerdo con esta visión, las matemáticas se descubren, no se crean. Las estructuras estudiadas por los matemáticos no son simples productos de la mente humana, sino que existen en un «Universo» independiente, que los matemáticos exploran mediante su trabajo; es algo parecido a la exploración del Universo físico que llevan a cabo los científicos. Si este razonamiento es correcto, es posible que haya cierta relación entre los dos «Universos», de manera que las estructuras descubiertas por los matemáticos serían efectivamente relevantes para las de los científicos.

Mantengo fuertes reservas acerca de la visión platónica. El proceso y el curso de los descubrimientos matemáticos parecen tan claramente vinculados con las peculiaridades del pensamiento humano que sería difícil creer que los matemáticos estén explorando un mundo independiente de la mente humana. Además, el Universo matemático —a diferencia del mundo físico— no puede explorarse con la mente y con los sentidos; sólo nos podemos acercar a él con nuestra mente. En ausencia de la más mínima indicación de que los conceptos matemáticos se originen fuera de nuestras cabezas, intelectualmente se justifica más que supongamos que el «Universo» matemático ha sido creado por nuestro pensamiento, y no que consideremos que tiene una existencia independiente. Aunque la tesis de los matemáticos platónicos sea correcta, sólo explicaría nuestra capacidad para aplicar estructuras matemáticas a la ciencia si es cierto que la cantidad de estructuras que existen en el Universo matemático es relativamente pequeña, y si ya hubiésemos explorado la mayoría de ellas. En caso contrario, es improbable que la exploración paralela de dos Universos independientes nos descubra en uno de ellos estructuras que sean relevantes para el otro.

Hay circunstancias dentro de ciertas áreas de la matemática en las que existe una cantidad limitada de estructuras que podrían aplicarse a la naturaleza, y en las que resulta factible realizar un examen de todas ellas. Por ejemplo, he señalado que sólo hay tres clases de espacio de curvatura constante, de manera que si nuestro Universo es un espacio de curvatura constante, tiene que pertenecer a uno de estos tres tipos. Sin embargo, no existe la menor indicación de que la cantidad total de estructuras matemáticas concebibles sea muy pequeña, o de que nos hallemos cerca de conocer un porcentaje importante de las posibilidades. Si ya hubiésemos descubierto la mayoría de las estructuras matemáticas concebibles, el ritmo de innovación matemática se estaría volviendo cada vez más lento, y no hay señales de que ocurra tal cosa. Por todos estos motivos, creo que no podemos mirar hacia el platonismo matemático para encontrar una explicación sobre la eficacia de la matemática en la ciencia.

Un enfoque opuesto pone de relieve que las nociones de matemática y de ciencia son algo creado en *ambos* casos por la mente humana. Si esto es así, no deberíamos sorprendernos de que dos conjuntos diferentes de ideas estén íntimamente relacionados, porque los dos tienen el mismo origen. En este punto de vista hay un elemento de verdad, pero si se lleva hasta el extremo implicaría que nuestra visión científica del mundo estará determinada en definitiva por lo que hay en nuestras cabezas, y no por lo que hay fuera de nosotros. No puedo aceptar esta noción de ciencia, aunque crea que esto es verdad en el caso de la matemática. Lo que los científicos descubren nos ha sorprendido tan a menudo que debe existir un componente de la ciencia que vaya más allá de las formas específicas en que piensan los seres humanos.

Este punto de vista «subjetivista» acerca de la relación entre la ciencia y la matemática adquiere la máxima relevancia cuando existe más de un análisis teórico posible con respecto al mismo cuerpo de conocimientos científicos. A menudo se descubre que, si bien determinada área de la ciencia fue descrita originariamente mediante un tipo de lenguaje matemático, resulta posible utilizar también otro lenguaje entre los diversos que existen. A veces se abandona la descripción original y se pasa a una nueva. Un ejemplo de ello fue el paso desde la formulación geométrica de la mecánica newtoniana hasta su formulación analítica. A veces una descripción matemática alternativa es tratada como si fuese una curiosidad, y los científicos no la

adoptan hasta mucho más tarde, cuando se descubre que es preferible a la luz de los nuevos descubrimientos.

Mi propia opinión acerca de las causas de la eficacia de la matemática para la ciencia se halla más cerca del punto de vista subjetivista, pero no es idéntico a éste. Empieza por la noción según la cual los conceptos de ambas disciplinas surgen de un conjunto de intuiciones que se origina en las mismas clases de experiencia humana. Existe una inmensa cantidad de estructuras simbólicas lógicamente coherentes, pero los matemáticos suelen mostrar un máximo interés por aquellas que han aparecido «naturalmente», en el curso del desarrollo de la matemática misma, y no en las estructuras inventadas de forma independiente. La matemática pura tiende a crecer como si fuese un árbol, originando nuevas ramas a partir de los problemas que han aparecido en las ramas ya existentes. Además, cuando los matemáticos inventan nuevas estructuras simbólicas para solucionar tales problemas, suelen utilizar conceptos directamente abstraídos de la vida cotidiana (aunque los utilicen y los combinen de maneras que no tengan una relación simple con la forma en que se dan en la experiencia ordinaria). Por ejemplo, la teoría de grupos se basa en la noción de «multiplicación», que se abstrae de la experiencia cotidiana de llevar a cabo —en un orden definido— dos actividades relacionadas, por ejemplo, dos movimientos distintos del mismo objeto.

Esto es cierto en buena parte en lo que respecta a los conceptos científicos. Aunque los cultivadores de la ciencia reflexionen sobre fenómenos muy distintos a los de la vida cotidiana —las partículas subatómicas, por ejemplo—, lo hacen mediante una nueva combinación de conceptos procedentes de la vida de cada día. Por ejemplo, una de las novedades auténticas del mundo atómico —el principio de incertidumbre de Heisenberg— se basa en la noción de que, cuando observamos algo, el acto de observación puede cambiar la propiedad que se está observando, al igual que la presión sanguínea de una persona nerviosa puede mostrar una elevación fulminante cuando el médico se acerca para medirla.

Como los conceptos básicos de la matemática pura y de la ciencia tienen su origen en la experiencia ordinaria, no deberíamos sorprendernos de que las estructuras que se estudian en una disciplina a menudo resulten aplicables en otras disciplinas. Sin embargo, a medida que se desarrollan la matemática y las

ciencias, quienes trabajan en cada uno de estos campos tienden a basar su labor en conceptos que se han introducido previamente dentro de ese campo, y no en conceptos que provengan de la experiencia ordinaria. Tales conceptos suelen ser ya bastante abstractos, y a menudo son tomados de experiencias que se comparten con quienes cultivan otros campos. Debido a ello, considero probable que —a medida que se desarrollen la ciencia y la matemática— habrá menos estructuras de una que pertenezcan a la otra. Este proceso es algo semejante a lo que ocurre durante la evolución biológica cuando, a medida que se separan dos especies originariamente relacionadas, su conducta y su aspecto se vuelven cada vez más diferentes.

A pesar de todo, los matemáticos continuarán creando un imponente dispositivo de estructuras simbólicas, algunas de las cuales continuarán desempeñando un papel central en el futuro de la ciencia.

7. LOS COMPUTADORES: LA CIENCIA ENTRA EN UNA NUEVA ERA

La utilización de computadores es el cambio más fundamental y más decisivo que ha tenido lugar en la forma de hacer ciencia durante los últimos años. Su creciente intervención no lleva trazas de frenarse; cabe predecir con seguridad que su empleo continuará provocando cambios impresionantes en el terreno científico.

Se han efectuado muchos estudios sobre las consecuencias del uso de computadores en lo que respecta a la sociedad en conjunto, pero no se ha prestado demasiada atención a sus efectos específicos dentro de la ciencia. Esto resulta sorprendente, porque, con la posible excepción de los videojuegos, no hay otro aspecto de la vida moderna donde el uso de computadores se encuentre más extendido.

En un primer momento, los computadores fueron desarrollados por científicos, que influyeron de modo significativo sobre su evolución. Lo que no se ha comprendido muy bien es la forma en que la utilización de computadores comenzó a determinar lo que llevan a cabo los científicos, ni cómo su empleo acaba por modificar la clase de actividad constituida por la ciencia.

En el ámbito científico ha habido dos tipos principales de aplicaciones informáticas: una dentro del trabajo experimental, y la otra en investigaciones teóricas. Los científicos experimentales han hecho uso de la capacidad de los computadores para registrar y analizar un gran volumen de datos en poco tiempo. Esto ha posibilitado la realización de muchos experimentos que, de otro modo, habrían estado más allá de nuestra capacidad

analítica. Además, el simple volumen de datos producidos por ciertos experimentos en física y biología es tan enorme que no se hubiesen logrado almacenar ni tener acceso a ellos si no se dispusiese de la capacidad de proceso de datos de los computadores.

En los experimentos de física de las partículas, ahora resulta posible explorar y analizar una gran cantidad de colisiones de partículas, para aislar un único acontecimiento que posea unas características específicas. En un experimento reciente, llevado a cabo en el laboratorio del CERN en Ginebra, mediante un computador fueron analizados un millón de ejemplos de colisiones de partículas a medida que iban ocurriendo. El computador buscó los acontecimientos de un tipo determinado, que demostraban la producción de una partícula no detectada previamente, llamada partícula W (fig. 23). Acabaron por identificarse cinco acontecimientos de este tipo. Esta clase de búsquedas pueden ser realizadas en principio por los seres humanos, pero no podríamos efectuarlas con tanta rapidez, y por supuesto, no mientras el experimento se está llevando a cabo. Antes de la aparición de computadores que sirviesen de ayuda eficaz para estos

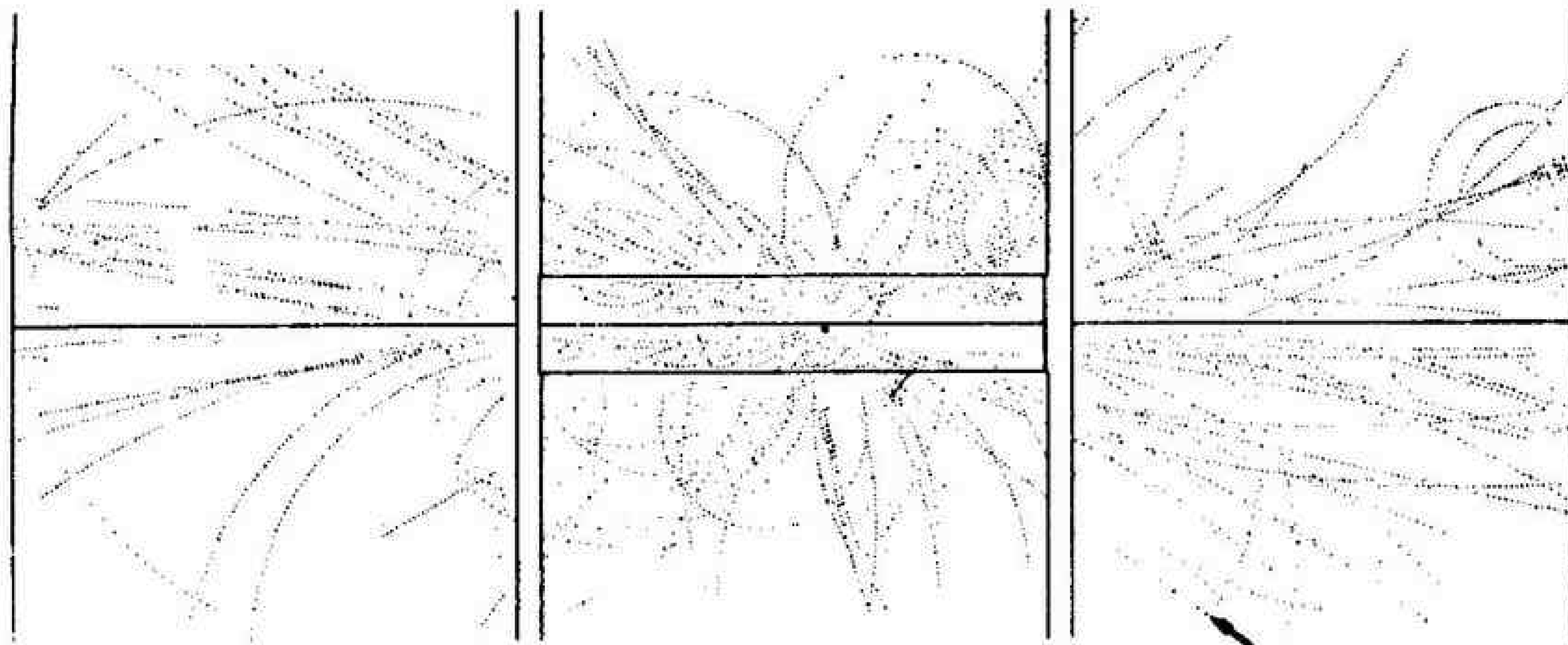


Fig. 23. Un acontecimiento complejo en el que intervienen partículas. La fotografía muestra muchos recorridos de partículas que están pasando a través de un detector. Los recorridos han sido reconstruidos mediante un análisis por computador de la salida del detector. Uno de los recorridos, indicado por la flecha, es el camino seguido por un producto de desecho de una partícula subatómica acabada de descubrir.

análisis, los físicos que estudiaban las partículas apelaban a gran cantidad de personas que hacían de «exploradores» en estas investigaciones. Los computadores han sustituido esencialmente a estas personas, convirtiéndolas en las primeras bajas causadas por la aplicación de los computadores a la ciencia.

Los computadores también han permitido un tipo diferente de experimentos, en los que se comparan grandes conjuntos de datos de forma sistemática, con objeto de buscar correlaciones ocultas. Los biólogos moleculares han utilizado esta posibilidad para buscar genes similares o para controlar elementos en los ácidos nucleicos de organismos diferentes.

A medida que los computadores sean cada vez más eficaces, estarán en condiciones de descubrir correlaciones existentes entre cantidades enormes de datos. En la actualidad esto suele plantear un problema: es necesario programar previamente los computadores para buscar determinados patrones en los datos. En otras palabras, el científico tiene que saber con antelación qué es lo que espera encontrar. Para los científicos sería mucho más útil si pudiesen encontrarse resultados inesperados que estén ocultos en los datos. Por ejemplo, a los astrónomos les interesaría saber si la radiación que llega a la Tierra desde un objeto astronómico lejano varía de intensidad según la estación del año. Sin embargo, a menos que un computador dedicado a analizar medidas de esta intensidad fuese programado para buscar tal correlación, probablemente ésta no se detectaría.

Esta limitación de los análisis mediante computador se superará cuando mejoren las capacidades de tratamiento de datos de esta clase de máquinas, de manera que se pueda investigar una gama más amplia de posibles correlaciones. Los computadores acabarán por poder buscar relaciones inesperadas entre grandes volúmenes de datos. A ello contribuirán los bancos de datos, en los que se almacenan grandes cantidades de información científica, de una manera que resulta accesible con facilidad al análisis informático.

Los computadores posibilitan llevar a cabo observaciones en lugares que de otro modo serían inaccesibles. Las sondas espaciales automatizadas ya han realizado muchas mediciones de esta clase, y algunos científicos sostienen que toda la exploración espacial puede y debe hacerse exclusivamente mediante sondas automatizadas. En el momento actual, sin embargo, los computadores no pueden controlar experimentos en los que

haya que tomar nuevas decisiones mientras dura el experimento en cuestión. El intento más completo de automatizar un experimento decisivo fue llevado a cabo por la sonda *Viking* en la superficie de Marte. Este experimento dejó sin respuesta importantes preguntas acerca de la vida en Marte, debido en parte a que allí no había personas que pudiesen variar algunos de los experimentos en los momentos decisivos.

Los avances en el campo de la inteligencia artificial y de la ingeniería molecular pueden crear pequeños paquetes informatizados con posibilidades de toma de decisiones comparables a las de los seres humanos. Cuando ocurra tal cosa, la elección entre el empleo de sondas espaciales con o sin tripulación humana se efectuará por motivos distintos a los de una mayor eficacia del ser humano. A pesar de todo, creo que los seres humanos no estarán dispuestos a dejar la exploración espacial en manos de los computadores, aunque éstos demuestren ser más eficaces.

EL ESTÍMULO A LA NATURALEZA

Para los científicos teóricos ha resultado muy útil la capacidad del computador para efectuar análisis numéricos, y en una medida limitada, para el manejo de símbolos. Esta capacidad ha permitido realizar cálculos que implican tantos pasos diferentes que sería imposible que los llevasen a cabo seres humanos en un tiempo razonable. Por ejemplo, las predicciones de la teoría del campo cuántico acerca de la forma en que se comportan los electrones dentro de los campos magnéticos han sido calculadas con una precisión muy elevada, que hace diez años hubiese sido inimaginable. En este tipo de cálculos, no se efectúa ningún cambio básico en la teoría física, aunque tengan que realizarse ciertas aproximaciones para adaptar los cálculos a los computadores. El cálculo del comportamiento de un electrón en un campo magnético, por ejemplo, implica gran cantidad de complicadas integrales. Utilizando un computador, dichos cálculos se han llevado a cabo mediante un esquema aproximativo conocido como método Montecarlo. Las integrales se calculan evaluando la función que se va a integrar en sólo una selección aleatoria de puntos dentro de la gama de variaciones. Si la selección aleatoria de puntos es lo bastante grande, este procedimiento

brinda un valor muy preciso de la integral requerida. Este sistema de aproximación es muy apropiado para los computadores, ya que éstos pueden ejecutar gran cantidad de cálculos numéricos individuales. El método Montecarlo se ha extendido ahora a otros cálculos de la teoría del campo cuántico, en especial a aquellos en los que el espacio-tiempo continuo es sustituido por una rejilla discreta. Existen ciertos indicios de que las propiedades de los quarks en interacción y de los gluones pueden interpretarse a través de estos cálculos.

Los métodos de simulación numérica también desempeñan un papel importante en la física experimental. En numerosos experimentos que los estudiosos de la física de las partículas han llevado a cabo, la calidad de los datos obtenidos por el equipo de detección no es muy precisa. Los datos pueden contener grandes volúmenes de efectos de fondo irrelevantes. Además, puede haber limitaciones tecnológicas en la precisión de los detectores mismos. Los científicos necesitan hacerse alguna idea sobre cómo van a responder sus instrumentos ante los fenómenos que esperan observar. Para lograrlo, utilizan modelos teóricos del proceso que han de estudiar para predecir el tipo de fenómenos que pueden ocurrir, y a continuación utilizan estas predicciones para calcular cómo responderán los detectores ante tales fenómenos. Estos cálculos (que a menudo se realizan mediante el método Montecarlo) pueden compararse con los datos efectivos que se obtienen en el experimento. Se trata de un enfoque experimental mucho más vinculado con los aspectos teóricos de lo que los científicos están acostumbrados. En definitiva, la necesidad de emplear este procedimiento en la física de las partículas procede tanto de la complejidad de los fenómenos como de la dificultad que existe para observar los fenómenos subatómicos individuales con instrumentos construidos a escala humana. Este empleo de modelos ha permitido que los científicos extraigan datos útiles de experimentos que hace sólo unos años habrían proporcionado un maremágnum de información inútil.

No obstante, este empleo de la teoría ha introducido nuevos peligros en la física experimental. Cuando los científicos deben construir un gran andamiaje teórico dentro del análisis de un experimento, se vuelve menos evidente qué es lo que está equivocado cuando los datos efectivos no coinciden con la simulación. Además, existe el peligro de que los datos valiosos que no

se ajusten al marco teórico se dejen a un lado, porque no se dispone de los métodos adecuados para analizar los datos. A pesar de todo, el uso de los computadores continuará desplazando la frontera entre la teoría y los experimentos en la ciencia física.

LA INTUICIÓN BASADA EN EL COMPUTADOR

La intuición es algo relacionado con los procesos del pensamiento inconsciente, y no con un análisis detallado de una situación. La intuición no es el resultado de una inspiración mágica; depende de las experiencias de la persona. Cuando en tales experiencias intervienen cálculos informáticos, como ocurre en muchos científicos jóvenes, estos cálculos se convierten naturalmente en una fuente de intuiciones utilizables en una labor posterior, aunque dicha labor sea analítica.

Nos lo demuestra un descubrimiento teórico recientemente efectuado por el científico norteamericano M. Feigenbaum. Con el uso de un sencillo computador —una calculadora manual— Feigenbaum descubrió un fenómeno matemático estrechamente relacionado con la aparición de conducta caótica dentro de sistemas deterministas. Su descubrimiento otorgó gran interés al ámbito del caos determinista, y muy pronto este campo se convirtió en tema de una intensa labor de análisis, que ha servido para aclarar y extender el resultado original.

Ciertos cálculos informáticos han sugerido profundos cambios en las teorías de la física, por ejemplo la sustitución del espacio-tiempo continuo por el espacio-tiempo discreto. Para algunos científicos, desde la introducción de un modelo que efectúe algunos cambios para una mayor sencillez de cálculo, hasta pensar en el modelo como en una parte fundamental de nuestra imagen del mundo, hay una distancia muy pequeña.

El tipo de problemas que se soluciona con la máxima facilidad mediante la informática hace referencia al cambio discontinuo, en el que la propiedad que está cambiando y la propiedad que hace que aquélla cambie saltan de un valor a otro, sin pasar por los valores intermedios. Por ejemplo, esto es lo que ocurre cuando describimos la ebullición de un líquido en un modelo donde el tiempo sea discreto en vez de continuo.

Debido a que resulta más conveniente para el cálculo informático, el cambio discontinuo se convertirá cada vez más en

parte integrante de los modelos de los científicos, y por consiguiente, será un elemento de importancia cada vez mayor en la intuición que poseen muchos científicos acerca de cómo se producen los procesos en la naturaleza. Esta intuición, a su vez, participará en el desarrollo de las futuras teorías.

Esta evolución en nuestro pensamiento constituye un fenómeno inesperado. Si —como sugirió Immanuel Kant— las propiedades que asignamos a conceptos como el de espacio son en parte una expresión del modo en que está construido el pensamiento de los seres humanos, si utilizamos nuevas herramientas que nos ayuden a pensar, llegaremos a perfeccionar nuestra descripción adscribiendo nuevas propiedades a nociones como la de espacio. Uno de los influjos más importantes que podrían ejercer los computadores sobre el contenido de la ciencia podría consistir en brindarnos nuevas intuiciones sobre cómo pensar acerca del mundo.

LA INTERPRETACIÓN DEL CÓDIGO GENÉTICO

El uso de computadores en biología está muy atrás en comparación con la física, pero esto empieza a cambiar, a medida que los biólogos moleculares obtienen más datos acerca de las grandes biomoléculas. Los biólogos moleculares han realizado un importante avance, consistente en el desarrollo de técnicas para «secuenciar» ácidos nucleicos, es decir, para determinar la secuencia de bases fundamentales a lo largo de determinada cadena de ADN o ARN. Cualquier lector habitual de las revistas de biología se topará con artículos en los que la parte principal del texto se reduce a una larga serie de símbolos como ACGA... (fig. 24), que representan las bases de una sección específica del material genético de un organismo.

Para determinar estas secuencias, hay que procesar gran cantidad de información química. En el caso de secuencias cortas, formadas por unos cuantos centenares de unidades, el problema de proceso resulta muy accesible. Pero como las longitudes de las secuencias se elevan al orden de decenas de miles, como ya ha sucedido, o de millones —lo cual corresponde a la información genética completa de una bacteria o de un cromosoma en una célula eucariótica—, los problemas que implica extraer la secuencia de los datos químicos se vuelve cada vez más

```
        1Ø         2Ø         3Ø         4Ø         5Ø         6Ø
TCTAGAGTGC ATCAGCTACA GTAAAGACTT GAAGGGCGAA GAAAGCTTCA TGCTGTCTAG
        7Ø         8Ø         9Ø        1ØØ        11Ø        12Ø
CAAAAGGGGA GGGGGGCACA CGTGTGAACA CAAAGAAAAC GGAGTCTAAT ACAGGGAATC
       13Ø        14Ø        15Ø        16Ø        17Ø        18Ø
GAACTTTGGA CCTTCCTAAC ACAAAGCAAC CTCACTACCC AGCTGAACCA CAGAAGAAAT
       19Ø        2ØØ        21Ø        22Ø        23Ø        24Ø
GAGTGTGATT GTTCCTCATC GCAGCATAAA CAAGTCTCTA CATCAGTGCC AGTTGCAGCC
       25Ø        26Ø        27Ø        28Ø        29Ø        3ØØ
ACAGCCACAA CCTTTGCGTC ACAGACCTCT CAGACGCCTC GGAAATAAAC ATCGGATCAA
       31Ø        32Ø        33Ø        34Ø        35Ø        36Ø
TCCTTGCTGG GCTCACTTTA TCCCCGACGC AGCAGCGCGT AGCCGAGTTA CTGCGCAGGC
       37Ø        38Ø        39Ø        4ØØ        41Ø        42Ø
ATCCGACAGA AAGCTAACAT CGATGTCAGG TCCAAGCAGA AGTGGAATTA AGGCTCAGCT
       43Ø        44Ø        45Ø        46Ø        47Ø        48Ø
GACAGCGGGA GAGCTTAAAT TTGCTATCTA GTGTGTGGTC CGCCGTGATC GTATAGGGGT
       49Ø        5ØØ        51Ø        52Ø        53Ø        54Ø
TAGTACTCTG CGTTGTGGCC GCAGCAACCT CGGTTCGAAT CCGAGTCACG GCATTATCCT
       55Ø        56Ø        57Ø        58Ø        59Ø        6ØØ
CTGGTCACTT TTTTGCTCCA CTCTCTCTCT GATGAACTCT TCCCTAÇAGA TCTACCCGCT
       61Ø        62Ø        63Ø        64Ø        65Ø        66Ø
TCCGCTCATC GTCACCCAGG AAGCGTGGGA AGTGCTTGCT CTCTCCCAAG CTGTTTTGCA
       67Ø        68Ø        69Ø        7ØØ        71Ø        72Ø
GGAAATGGGA ATGAACCTTT AATGTCTTTG AATCCATCCT GCTGCAGCGG GCTGTCAGCA
       73Ø        74Ø        75Ø        76Ø        77Ø        78Ø
GTCAGCATTC ACCTTCTTCA TATTTGTATG CATATTGTAA TAAAACTACC GAAGCATCTT
       79Ø        8ØØ        81Ø        82Ø        83Ø        84Ø
ACAATAAAAT GGTTTTGAAA AGTCAACACC TGGACCAGGT TACTGTGAAA TTTCCTCATC
       85Ø        86Ø        87Ø        88Ø        89Ø        9ØØ
CGTCTGTGAG GGGAGGGGTG GAGAGGGAGG AGGGACAGGG AACCATGGTG CATCCTAGAA
       91Ø        92Ø        93Ø        94Ø        95Ø        96Ø
GGTCAGAGGA AAATTTTCAG GAATTGAAGG AACTTGGCTT TACCAGGCTT TCAGGGCAAG
       97Ø        98Ø        99Ø       1ØØØ       1Ø1Ø       1Ø2Ø
TCCTCCCACC CACCTTAAAA AGGTGCGGCC CACTGGCTTT TTCCTGTTTG CTTGTTTTTG
      1Ø3Ø       1Ø4Ø       1Ø5Ø       1Ø6Ø       1Ø7Ø       1Ø8Ø
ACAGGGTCTC ACGCTGTCCT GTAACTTGAA CTCCTGATCC TCCTGCCTCA GACCCTGAGT
      1Ø9Ø       11ØØ       111Ø       112Ø       113Ø       114Ø
ACTAGGATTA CAGACATTAG CTAACAAGCC AGGCTGAGTT TTACTCCTTG ATTCTCATGA
      115Ø       116Ø       117Ø       118Ø       119Ø       12ØØ
GTGAATGTGC CTCCGCTGGC CCACCAGGTT TTTCCATAGC TTTCGTGCCT TGGGAATCTG
      121Ø       122Ø       123Ø       124Ø       125Ø       126Ø
TCCACTTTGG TGTGGTTATC ACTCCTTCGT TTGATTTCCT TTTGGTTTGA GTGGGAGGGC
      127Ø       128Ø       129Ø       13ØØ          3         13
GATATGTATG TGTTCTATCA CACTGGATTC CATCTTGGGG GTCTAGA
```

Fig. 24. Subsecuencia de ADN. Parte de la secuencia de ADN de un ratón. La secuencia que se muestra incluye un gen que codifica una forma de ARN.

difícil. Los computadores ya están desempeñando un papel importante en la solución de estos problemas, porque permiten un minucioso registro y almacenamiento de datos.

Una utilización más fundamental de los computadores tiene lugar en el proceso de datos en sí mismo. Esto puede ilustrarse

mediante uno de los métodos diseñados por el biólogo británico F. Sanger, conocido por el nombre de «secuenciación tipo escopeta». Este proceso implica esencialmente un problema de desciframiento. Los científicos tratan de reconstruir un largo mensaje —la cadena de ADN— a partir de gran número de segmentos cortos que se solapan, sin un orden definido, y que han sido obtenidos cortando la cadena en determinados lugares elegidos con antelación (fig. 25). Los segmentos individuales sólo pueden tener una longitud de unos cuantos centenares de bases. Si el mensaje original posee una longitud mucho mayor, habrá una gran cantidad de segmentos que necesiten ajustarse en el orden conveniente. Los seres humanos podrían tratar de hacer esto sin ayuda, pero encontrar la secuencia correcta implicaría realizar decenas de miles de comparaciones sin el menor error. Se han escrito programas informáticos sencillos para obtener secuencias que contengan incluso decenas de miles de bases, y es probable que estas técnicas puedan extenderse hasta llegar a obtener la secuencia completa de ADN de una bacteria o del cromosoma de un mamífero. De este modo conoceríamos toda la información genética de un organismo vivo.

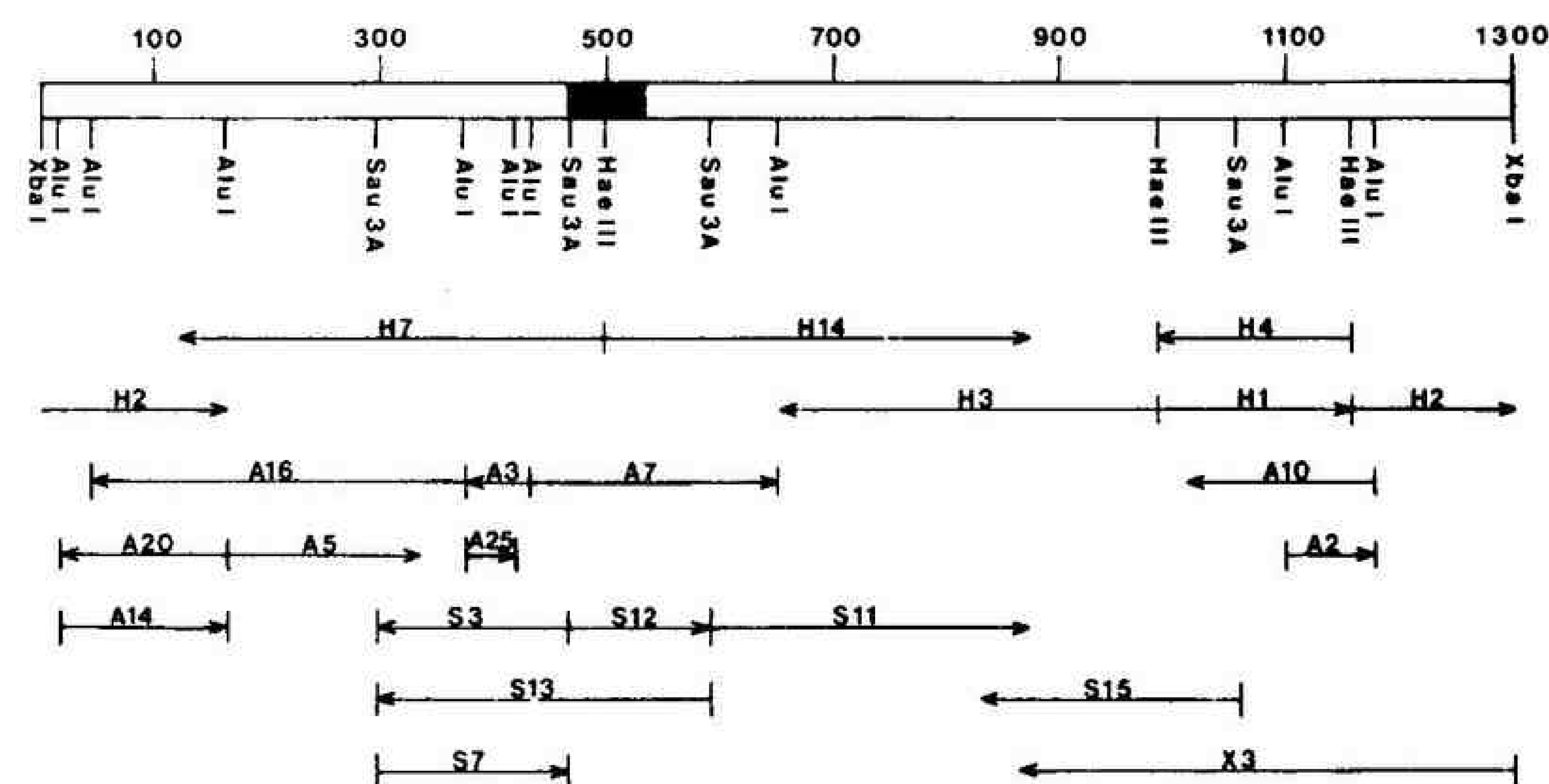


Fig. 25. Método para secuenciar el ADN. La barra larga que aparece en la parte superior representa toda la secuencia que se mostraba en la figura 24. Las barras cortas que hay más abajo indican subsecuencias que fueron colocadas juntas mediante un examen de sus regiones de solapamiento.

Esta información, por supuesto, no constituiría el final de la historia, sobre todo en el caso de los organismos superiores. Conoceríamos el código genético del organismo, y por lo tanto, todas las proteínas que dicho organismo puede producir. Sin embargo, tal información no sería suficiente para comprender todo el comportamiento del organismo. Sería como tener el texto de un libro, pero sin comprender demasiado la lengua en que está escrito ese texto.

Hay varios motivos para ello. Hemos visto que gran parte de la secuencia de ADN no codifica para las proteínas. Determinado porcentaje de esa secuencia se utiliza para producir otras importantes sustancias bioquímicas, por ejemplo, el ARN. Otras partes sirven para controlar la expresión de los trozos que sí codifican, y no puede comprenderse mediante el mero conocimiento del código de las proteínas. Además, en un organismo real, las proteínas se producen en combinaciones específicas y bajo condiciones específicas, todas ellas conectadas de una forma muy complicada.

Para comprender cómo funciona un organismo, los biólogos tienen que estudiar las correlaciones existentes entre las secuencias específicas de su ADN y los aspectos de su comportamiento a nivel celular. Necesitamos una traducción de subsecuencias completas, que controlen aspectos específicos de la conducta celular, y no una mera traducción de las «palabras» individuales. Necesitamos saber algo acerca de la gramática del ADN, y no únicamente su vocabulario. Una manera de lograrlo consiste en buscar secuencias comunes en diferentes cadenas de ácido nucleico que se relacionen con aspectos específicos del comportamiento. Por ejemplo, cada vez que una célula esté a punto de dividirse quizá se produzca un tipo de ARN. Comparando estos ARN de diferentes células quizá se compruebe que existen algunas secuencias comunes, y otras que varían entre las diversas células. Esto nos indicaría que las secuencias comunes estaban implicadas de forma directa en la división celular. Los estudios de esta naturaleza ya han comenzado, y acabarán por proporcionarnos una comprensión de las frases y de los párrafos del código genético, además del conocimiento de letras aisladas que hoy poseemos.

Otro enfoque implica el estudio de la conexión entre la secuencia lineal de bases y las formas en que las cadenas de ácidos nucleicos se doblan sobre sí mismas en dos y tres dimensiones. Como ocurre con las proteínas, es probable que la forma en que los ácidos nucleicos funcionen biológicamente esté íntimamente conectada con estos aspectos multidimensionales de su estructura. No sabemos cómo la secuencia de bases determina estas estructuras superiores de ácidos nucleicos, y tampoco si esto en realidad es así, pero se están efectuando estudios sobre el particular. También pueden estudiarse otras cuestiones —por ejemplo, cuál es la información existente en el ADN que sirve para controlar la transcripción del ADN en el ARN— mediante un análisis de las secuencias de ADN, y una comparación de su forma en las diferentes células y las diferentes especies.

Los computadores desempeñarán un importante papel en estos estudios. Por ejemplo, si varias secuencias de ácido nucleico —cada una de las cuales contiene cientos o miles de bases— se comparan para buscar segmentos comunes, el proyecto involucrará millones de comparaciones individuales. Los computadores resultan claramente superiores a los seres humanos en tales tareas, y el utilizarlos para este propósito nos permitirá descubrir correlaciones en las secuencias de ácidos nucleicos, que quizá de otro modo permanecerían ocultas.

Se están compilando bases de datos a partir de las secuencias conocidas de los ácidos nucleicos. Es posible comparar automáticamente las nuevas secuencias con las que ya están en los bancos de datos, para ver qué clases de semejanzas existen entre ellas. En definitiva, los estudios realizados mediante computador nos ayudarán a comprender cómo es que los seres vivientes traducen la información genética que hay en sus células a las actividades específicas que llamamos vida.

CÓMO INFLUYEN LOS COMPUTADORES EN LA MANERA DE HACER CIENCIA

El papel que en la actualidad desempeñan los computadores en la ciencia teórica y experimental ha modificado la clase de talentos que se requieren para una investigación eficaz. También ha aproximado entre sí estos dos ámbitos. Los científicos experimentales necesitan ser más expertos en el manejo de símbolos y en el análisis lógico que se requiere para escribir programas informáticos eficaces. El ansia calculadora de los teóricos a menudo se ve limitada por la cantidad de dinero necesaria para

comprar tiempo de computador y por la capacidad calculística de los computadores existentes. Sin embargo, se han dedicado a diseñar —y en ciertos casos, a construir prácticamente— sistemas informáticos a la medida de sus necesidades específicas. Estas tendencias desdibujarán la tajante división que existe entre los científicos teóricos y los experimentales, que ha caracterizado a la física del siglo XX.

En la actualidad, los posgraduados en física experimental o teórica dedican la mayor parte de su tiempo a escribir y perfeccionar programas informáticos, y no a diseñar nuevos instrumentos para efectuar observaciones o encontrar nuevas maneras de solucionar analíticamente ecuaciones. Cuando estos posgraduados se conviertan en directores de grupos de investigación, lógicamente van a emplear computadores en la mayoría de problemas que investiguen.

Los computadores se convertirán en la norma en todas las áreas de la ciencia en las que se pueden obtener grandes cantidades de datos. Incluso aquellos campos como la biología de la evolución se aprovecharán de estos datos. Los investigadores en el ámbito de la biología molecular, que estudian los cambios que se producen a lo largo del tiempo en la secuencia de ácido nucleico de los distintos organismos, ya han comenzado a utilizar con provecho el proceso de datos.

Este cambio en la forma de manejar los datos podría tener consecuencias interesantes. En el siglo XVI Francis Bacon describió un modelo de investigación científica que consistía en recoger datos y, a continuación, buscar en ellos posibles patrones que fuesen considerados como leyes generales. Este modelo baconiano en realidad no ha sido adoptado por los científicos, porque no existía un método directo de descubrir patrones en los datos. Los computadores —que están en condiciones de analizar grandes volúmenes de datos y buscar patrones— pueden dirigir la ciencia en un sentido más baconiano que lo que en el pasado se ha considerado plausible. El hecho de que funcione este enfoque de la investigación científica dependerá de las interrelaciones entre las nociones de la ciencia y la estructura de la mente humana, interrogante que nunca se ha contestado de veras. No sabemos en qué medida las ideas que empleamos para describir el mundo son el resultado de las peculiaridades humanas, como algo opuesto a formar parte del mundo en sí mismo. Lo conveniente sería que la respuesta no procediese de

una especulación filosófica sino de los métodos empíricos de la ciencia en sí misma.

LOS COMPUTADORES DEL FUTURO

Ningún comentario sobre el papel de los computadores en la ciencia del futuro quedaría completo sin tomar en consideración la evolución posterior de los computadores mismos. Las posibilidades de la informática evolucionan con mucha rapidez. Una consecuencia de esta evolución será que los computadores no sólo serán herramientas mejores para ayudar al pensamiento humano, sino que también se convertirán en colegas de éste.

Una de las maneras de convertir los computadores en herramientas más efectivas consiste en desarrollar un *hardware* más perfecto para llevar a cabo las operaciones informáticas. Este *hardware* contendrá más elementos individuales recíprocamente integrados, lo cual significa que más elementos podrán influir rápidamente entre sí. Un computador de esta clase podrá efectuar mejor operaciones tales como, por ejemplo, el manejo de símbolos matemáticos. En el momento actual dichas operaciones tienen que ser programadas después, y por lo tanto se llevan a cabo con menos eficacia.

El tamaño de los elementos constitutivos de los computadores seguirá disminuyendo, lo cual permitirá una capacidad de rapidez y de integración aún mayores, aunque acaben por plantearse limitaciones. No conocemos ningún modo en que los elementos individuales estén más próximos entre sí que los átomos de un cuerpo sólido, y ninguna forma en que la información se pueda transmitir entre dichos elementos a una velocidad superior a la de la luz. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones se podrán construir computadores millones de veces más eficaces que los fabricados hasta ahora. El desarrollo de computadores que utilicen como elementos a los átomos individuales requerirá en sí mismo una tecnología nueva.

Los mejoramientos en la rapidez y la integración de los computadores, y la correspondiente disminución en su tamaño, harán que los computadores futuros resulten mucho más útiles en sus aplicaciones científicas. La actual capacidad de los computadores queda saturada muy pronto por los cálculos que hoy se requieren —aunque sean de un orden modesto—, sobre todo

cuando hay que efectuarlos en tres dimensiones o más. Una mayor velocidad, y el costo inferior que permitirá un tamaño menor, posibilitará la realización de cálculos y análisis de datos considerablemente más sofisticados que los actuales.

La mayor rapidez y baratura de los computadores también servirá para acelerar la descentralización en su empleo. En numerosas aplicaciones científicas se ha sustituido los grandes sistemas informáticos centralizados, utilizando en cambio microcomputadores individualizados. A medida que se abaraten los computadores, cada vez habrá más científicos que trabajarán con sus propias máquinas, en vez de utilizar una pequeña parte de un computador central. Esto permitirá una mayor personalización de los computadores en su empleo para lograr los objetivos de cada científico individual, avance que permitirá una evolución aún más rápida de las posibilidades informáticas. Esta tendencia a la descentralización ayudará también a eliminar uno de los problemas principales en la utilización de los computadores: la inaccesibilidad del computador central, ya sea porque hay demasiada gente que aspire a utilizarlo al mismo tiempo, o porque se halle temporalmente fuera de servicio.

Otra evolución de los computadores consiste en desarrollar nuevos métodos en la lógica que emplean para solucionar problemas. Uno de los métodos que se está aplicando cada vez más recibe el nombre de proceso paralelo. Implica dividir un problema en muchas partes idénticas, cada una de las cuales se lleva a cabo al mismo tiempo (en paralelo) en muchos computadores pequeños, todos ellos controlados por una unidad central. Ya se han construido estructuras de proceso en paralelo para ciertas aplicaciones en física de las partículas. Pueden realizar cálculos específicos con mucha más rapidez que los mejores «supercomputadores» de ámbito general que existan, y a un costo muy inferior. Varios de mis colegas del departamento de física de la Universidad Columbia están empleando este método para estudiar las interacciones de quarks y gluones en el espacio-tiempo discreto (fig. 26).

Un avance en la lógica de las aplicaciones informáticas posee una ventaja importante en comparación con el nuevo *hardware* en computadores: se halla bajo un control más directo de los científicos mismos, y por lo tanto, no asume el carácter de intrusión en su investigación. Además, el científico que desarrolle un modo nuevo y poco costoso de utilizar los computadores

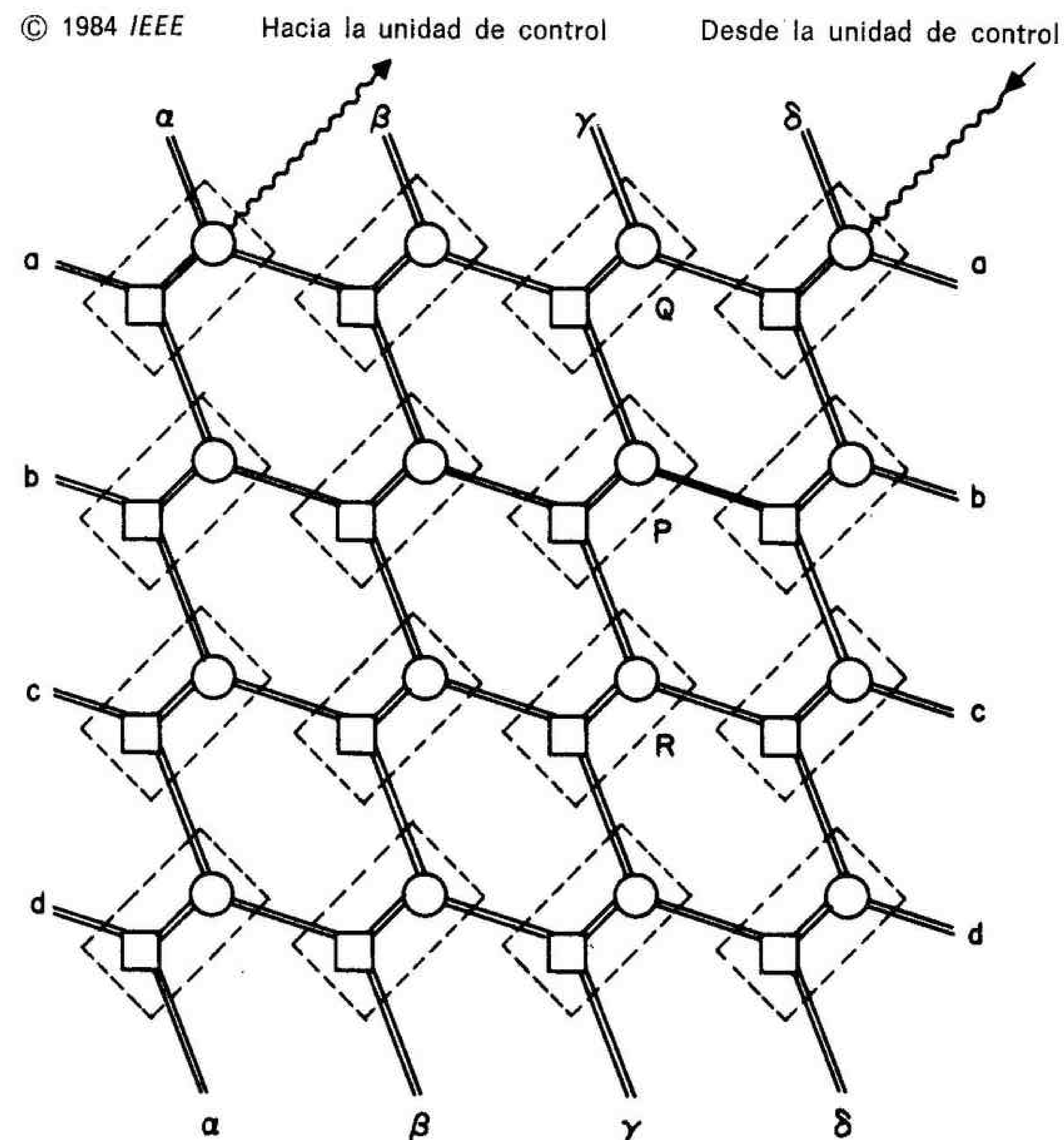


Fig. 26. Esquema de un procesador en paralelo. Cada círculo y cuadrado que están rodeados por una línea de puntos representa un microprocesador y una unidad de memoria que funcionan autónomamente. Las líneas que los unen representan el flujo de información que se da entre tales unidades.

existentes probablemente afecte menos los recursos económicos disponibles para sus colegas, en comparación con aquel otro que insista en la compra de nuevo y costoso *hardware*. Ambos factores ayudarán a allanar el camino hacia una aceptación ge-

neralizada de los computadores en la ciencia, incluso en aquellos lugares donde en la actualidad no se utilizan.

Una de las posibilidades más sorprendentes que existen es que algún día se crearán computadores que igualarán o incluso superarán las capacidades del ser humano en el desarrollo de nuevas ideas científicas. Esta posibilidad es una consecuencia del campo de investigación que recibe el nombre de inteligencia artificial. Los cultivadores de este campo tratan de construir y de programar computadores que imiten las capacidades intelectuales específicas del ser humano, por ejemplo, la demostración de teoremas matemáticos o el diagnóstico de una enfermedad.

Esta investigación se ha propuesto dos objetivos un tanto diferentes. Uno de sus propósitos consiste en obtener nuevas perspectivas útiles sobre el pensamiento humano, mediante el estudio de otro tipo de pensamiento, que se manifiesta a través de la electrónica y no de las neuronas. El otro objetivo —que probablemente constituirá la principal aportación de este campo a la ciencia futura— consiste en lo que llamo «computadores realmente listos», cuyas capacidades intelectuales sean comparables a las de los seres humanos, o incluso superiores.

Hasta este momento se ha logrado un nivel de inteligencia en el computador que es superior a lo esperado por muchos críticos de este ámbito de investigación, pero inferior a las predicciones de algunos de sus cultivadores. Se han construido computadores —o se les han dado las instrucciones pertinentes— para que lleven a cabo diversas actividades a niveles comparables con los del ser humano. Algunas de estas actividades, por ejemplo, jugar al ajedrez, son consideradas como señal de inteligencia elevada cuando los seres humanos las realizan. Hay otras actividades humanas —por ejemplo, traducir con precisión de una lengua a otra— que los computadores aún no han logrado realizar con mucho éxito. Hemos conseguido con más facilidad que los computadores hagan aquellas cosas que nosotros aprendemos relativamente tarde en nuestra vida, jugar al ajedrez, por ejemplo, y no tenemos tanto éxito en aquellas cosas que aprendemos al principio de nuestra existencia, por ejemplo, comprender el lenguaje o reconocer patrones fijos. Quizás estas últimas capacidades sean un elemento intrínseco del cerebro humano, en cuyo caso tendríamos que construirlas directamente en el *hardware* informático, y no programarlas en el *software*.

De manera alternativa, podría ocurrir que comprendamos menos aquellas capacidades que se desarrollan en una fase precoz, y que por lo tanto no logremos imitarlas de manera adecuada.

En mi opinión, cuando comprendamos una actividad intelectual lo bastante bien como para describir con claridad qué es lo que lleva a cabo, acabaremos por enseñar a un computador que la haga. Quizá no habrá un único conjunto de *hardware* informático que esté en condiciones de llevar a cabo todas las funciones «intelectuales». No obstante, tampoco un único ser humano puede realizar a un nivel elevado todas las actividades intelectuales que se hallan dentro de la capacidad de por lo menos algunos miembros de nuestra especie. Además, en aquellas actividades en las que existen diversos niveles de excelencia, como es el caso del ajedrez, quizá los computadores puedan acabar superando los logros más elevados del ser humano. ¿Por qué? Por lo siguiente: el rendimiento de un computador puede basarse en los pasados logros de una forma más directa que el rendimiento humano. Los mejores jugadores de ajedrez utilizan como ayuda las partidas realizadas por sus antecesores, pero los computadores pueden hacer lo mismo con mayor fiabilidad y con un acceso más rápido. No se pueden imitar las circunvoluciones cerebrales que producen los campeones humanos de ajedrez, pero resulta sencillo incorporar a los futuros computadores cualquier mejora en el diseño informático que permita jugar mejor al ajedrez.

Este análisis ha convencido a muchos científicos de que la mayoría de las funciones intelectuales específicas que los científicos humanos lleven a cabo puede acabar siendo realizada con más eficacia por un computador. Si esta predicción resulta correcta, cambiará drásticamente el futuro contenido de la ciencia y las vidas de los científicos futuros. Los científicos hacen ciencia, y la sociedad les da apoyo, con dos objetivos: comprender el Universo y mejorar las condiciones de vida humana a través de la tecnología. Los computadores realmente listos tendrán diferentes efectos sobre estos dos objetivos.

A los científicos les interesa comprender el Universo de una manera que tenga sentido para los seres humanos. Para este objetivo podría ser irrelevante la existencia de computadores que entiendan las cosas a su modo. De hecho, pocos de los principales investigadores que conozco siguen con avidez la labor de los demás científicos. Utilizan las ideas generales de los demás,

pero prefieren elaborar los detalles por su cuenta. Para muchos investigadores activos, la búsqueda de comprensión es una tarea personal, y no una simple parte de un proceso colectivo. Una de las paradojas de la ciencia es que dicha comprensión exige una aceptación generalizada por parte de una comunidad que trabaja sobre los mismos problemas, pero esa comprensión depende en último término de las mentes de los científicos individuales, donde surge únicamente después de haberse expresado en términos de carácter personal.

En consecuencia, los computadores realmente listos que se utilizan en la investigación científica no se convertirán en «oráculos» capaces de reflexionar por su cuenta sobre el Universo, y a continuación contestar cualquier pregunta que les formulen los científicos. Si se creasen máquinas de esta clase, serían irrelevantes para el tipo de comprensión científica personal que buscan los científicos. Es posible que —de todas maneras— deseemos desarrollar esta clase de computadores, junto con las aplicaciones tecnológicas de la ciencia. En este caso la comprensión queda subordinada al propósito de modificar el Universo. Sería muy útil un computador que nos diga cómo construir una nave espacial más perfecta, aunque no nos pueda explicar la visión del Universo que le llevó a extraer dichas conclusiones.

Una aplicación más probable de los computadores realmente listos dentro de la ciencia consistirá en asociarlos a la investigación que lleven a cabo los científicos individuales. Para que tenga lugar este avance, los computadores tendrán que volverse mucho más capaces de recibir y procesar datos directamente provenientes de los seres humanos. Esto se logrará enseñándoles a comprender el lenguaje humano, o quizá permitiéndoles un acceso directo al cerebro humano mediante alguna clase de conexión electrónica. No parece demasiado difícil lograr tal comunicación, sobre todo si el computador necesita entrar en interacción con una sola persona.

En el futuro que imagino, en la etapa inicial de la formación de un científico el computador actuará como maestro, y luego como colaborador de investigación. Este computador dispondrá de un rápido acceso a computadores centrales con una inmensa capacidad de información y de proceso de datos, que pondría a disposición del ser humano. La comunicación entre el computador y el ser humano será tan rápida como la que existe entre

dos personas, e incluso mucho más rápida, si el computador tiene acceso directo al cerebro. En la actualidad, una comunicación y una identificación tan íntima del computador con la manera de pensar de un individuo se encuentran fuera del alcance de los computadores, pero esto probablemente no dure mucho.

La mayoría de los científicos disfrutarán sin duda con un colega informático, cuyos procesos de pensamiento —gracias a una prolongada experiencia compartida— sean muy semejantes a los suyos propios. Sería algo parecido a tener un ayudante humano de larga dedicación, pero sin los problemas personales que a menudo aparecen en estos casos. Los resultados de tal colaboración entre hombres y máquinas podrían ir más allá de los resultados del esfuerzo por separado de los dos colegas.

El hecho de que los computadores inteligentes sirvan a los científicos como fiables compañeros de pensamiento, sería un beneficio para nuestra inversión intelectual en inteligencia artificial mucho mayor que casi cualquier descubrimiento científico específico que los computadores puedan hacer por su cuenta. Esta asociación constituye quizá la máxima promesa que la investigación sobre inteligencia artificial plantea a los científicos, y al futuro desarrollo de la ciencia.

PARTE IV

LA CIENCIA DEL SIGLO XXI

8. EL FUTURO CONFIGURADO POR LA CIENCIA: LA AVENTURA TECNOLÓGICA

Existen por lo menos tres tipos de tecnología del futuro. Uno de ellos aplica la ciencia actualmente conocida, y lo único que exige es el desarrollo de una ingeniería, o bien el tiempo y el dinero necesarios para ponerla en funcionamiento. Un ejemplo reciente fue la construcción del primer reactor nuclear, después de haber comprendido los detalles de la fisión nuclear. Un ejemplo actual es la construcción de reactores de fusión nuclear.

Un segundo tipo implica centrar nuestra atención en tecnologías que sólo puedan llevarse a la práctica a través de nuevos descubrimientos científicos. Un ejemplo sería hallar la manera de detener e invertir el proceso del envejecimiento humano. Un ejemplo del pasado fue el deseo de curar enfermedades infecciosas como la tuberculosis, que llevó a la creación de la terapéutica mediante antibióticos. Otro ejemplo fue, en el siglo XIX, la propuesta de Charles Babbage de construir un computador de ámbito general. Aunque Babbage tenía una noción correcta sobre cómo habría que diseñar tal computador, la puesta en práctica de su sueño exigía que se desarrollase la electrónica. Resulta difícil prever con antelación este tipo de tecnología, y requiere cierta dosis de imaginación.

Por último, existe una clase de tecnología tan revolucionaria que no puede imaginarse en absoluto. Hubo una época, por ejemplo, en que el viaje a otros planetas era algo estrictamente inconcebible. Fue preciso esperar hasta la época de Galileo y de Kepler para caer en la cuenta de que algunas de las luces que

titilan en el cielo nocturno eran en realidad mundos como el nuestro.

En esta exposición omitiré el primer tipo de tecnología; ha sido tratado por numerosos autores y además se solapa en cierta medida con otras secciones de este libro. La mayoría de lo que aquí diré se referirá al segundo tipo de tecnología futura, bajo la guía de mis propias conjeturas sobre la ciencia del futuro. Por razones obvias, hablaremos muy poco sobre el tercer tipo de tecnología.

¿Qué relación existe entre la ciencia y la tecnología? Como hemos visto, no es raro que una investigación científica específica esté motivada por el deseo de desarrollar una tecnología en particular. Por ejemplo, gran parte de la actual investigación sobre biología celular es consecuencia del deseo de hallar la curación del cáncer, y de la decisión tomada por diversos organismos que subvencionan las investigaciones encaminadas a tal objetivo.

Sin embargo, la tecnología puede avanzar también con independencia de la ciencia. En otras palabras, se efectúan descubrimientos útiles aunque no se comprenda —o se comprenda muy poco— cómo funcionan dichos descubrimientos. Ha ocurrido tal cosa en muchos descubrimientos realizados en el campo de la tecnología médica, por ejemplo, en los analgésicos. Sigue sin entenderse del todo cómo actúa una sustancia como la aspirina para aliviar el dolor, aunque estas lagunas en la comprensión a menudo empujan a los científicos hacia nuevas áreas de investigación. Este patrón —según el cual los avances tecnológicos tienen lugar con independencia de su comprensión científica— se está volviendo menos frecuente en la medida en que la ciencia llega a abarcar una parte creciente de los fenómenos directamente involucrados en la vida humana. Sin embargo, el descubrimiento tecnológico «autónomo» seguirá siendo el punto de partida de algunas de las tecnologías del futuro más interesantes.

Al describir posibles tecnologías futuras, no necesariamente afirmo que las «apruebe». Algunas podrían provocar cambios inmensos en la vida humana, e incluso en aquello que constituye la esencia del ser humano. No obstante, precisamente porque estas tecnologías pueden cambiar tan radicalmente nuestras vidas, resulta obligado imaginarse ahora sus efectos.

LAS TECNOLOGÍAS FÍSICAS

La mayor parte de la tecnología del mundo moderno ha implicado una aplicación de las ciencias físicas, y no de las ciencias biológicas, y por eso el mundo no viviente —el mundo de los objetos y del *hardware* —es el que más se ha transformado. Un ejemplo de esta clase de tecnología son los computadores y los aviones a reacción. Aunque parece probable que las tecnologías biológicas o psicológicas van a desempeñar los papeles más importantes en el futuro, continúa habiendo muchas posibilidades interesantes para la tecnología física, a medida que las ciencias físicas siguen efectuando nuevos descubrimientos. Dos de estas posibilidades son el desarrollo de medios para explorar entornos en la actualidad inaccesibles, y la construcción de estructuras en las que las moléculas individuales están ordenadas de acuerdo con un plan global.

Tendemos a pensar que en la superficie de la Tierra hay una amplia variedad de ambientes, pero en realidad la gama de temperatura, presión, radiación o la mayoría de los otros parámetros físicos no es demasiado extensa. Se trata de la estrecha gama de condiciones ambientales en las que pueden vivir y funcionar los seres humanos, sin necesidad de una protección especial. No obstante, la mayoría de los entornos del Universo —y algunos de los que existen en la misma Tierra o cerca de ella— son muy diferentes. Para explorar personalmente estos ambientes hostiles, necesitamos una protección considerable; debemos llevar con nosotros nuestro entorno habitual, en forma de nave espacial o de batiscafo. De manera alternativa, podemos enviar sustitutos —equipo automatizado— para que realicen la exploración en lugar nuestro.

Este enfoque «sustitutivo» ya ha extendido la gama de ambientes que podemos explorar hasta incluir el fondo de nuestros océanos, la superficie de Marte y el espacio interplanetario. No obstante, hay algunos entornos cercanos —por ejemplo, las profundidades de la Tierra— que ni siquiera nuestros enviados mecánicos pueden explorar aún. Desarrollar métodos para tal exploración constituirá un importante desafío para la tecnología del futuro.

El tipo de entornos que en la actualidad más nos cuesta ex-

plorar son aquellos en los que tanto la temperatura como la presión son muy elevadas. Podemos explorar hasta cierto grado los entornos de alta presión y baja temperatura, como, por ejemplo, el fondo de los océanos, con sondas automatizadas y a través de seres humanos que utilizan entornos protegidos. También podemos explorar partes del espacio interplanetario donde las temperaturas son altas pero las presiones son bajas. Sin embargo, no hemos sido capaces de estudiar durante un período superior a unos cuantos minutos un ambiente como el de la superficie de Venus, donde predominan simultáneamente las altas temperaturas y las altas presiones. En esta clase de ambientes se dan constantes colisiones entre los átomos del entorno y los de la sonda que introducimos en él para estudiarlo. Estas colisiones elevan la temperatura de la sonda, hasta que se iguala con la del ambiente en cuestión. Además, las temperaturas y las presiones elevadas tienden a acelerar los ritmos de las reacciones químicas entre las sustancias del ambiente y los materiales con que está fabricada la sonda. Como consecuencia, la forma física y química de la sonda cambia muy pronto y deja de funcionar.

Los científicos han tratado de encontrar algún modo de proteger la parte operativa de la sonda con respecto a este tipo de ambiente, pero no han tenido demasiado éxito. A menudo existen muchas fuerzas diferentes que intervienen para destruir la sonda, y resulta difícil preverlas todas, o por lo menos protegerse contra las que conocemos. Éste fue el problema que se planteó en algunas de las sondas soviéticas que fueron enviadas a Venus durante la pasada década. Cada sonda fue fabricada de forma que resistiese al factor que había destruido la sonda precedente, pero cada nuevo modelo sucumbía con rapidez ante algún otro factor que no había tenido tiempo para actuar con antelación.

Aunque sea probable que pronto construyamos una sonda más resistente para estudiar a Venus y otros entornos semejantes, existen ciertos lugares —por ejemplo, el interior del Sol— que no podemos aspirar a explorar con un dispositivo fabricado de materia normal. Sin embargo, el Universo contiene tipos de materia diferentes a los que se encuentran sobre la Tierra, y es posible que encontremos un modo de emplearlos para proteger nuestros instrumentos —y quizás a nosotros mismos— de la destrucción en condiciones extremas.

Por ejemplo, dentro de un tipo de estrella envejecida que recibe el nombre de enana blanca, se halló una materia cuya densidad es un millón de veces superior a la de la materia corriente. En la superficie y en el interior de las estrellas de neutrones existe materia con una densidad todavía mayor. Estos tipos de materia densa —y otros que también se conocen— resultarían invulnerables incluso en algunos de los entornos más desapacibles que se encuentran en nuestro Sistema Solar.

Sin embargo, para ello existe un inconveniente. En la medida de nuestros conocimientos, se puede conseguir esta forma de materia —y resulta únicamente estable— en las condiciones de gigantesca gravedad que se dan en las estrellas que han sufrido un colapso, como es el caso de las enanas blancas. Aunque pudiésemos transportar a la Tierra parte de dicha materia, es probable que se volviese inestable, y que cambiase a algún tipo de materia corriente antes incluso de llegar aquí. No obstante, quizá no sea una insensatez total la perspectiva de utilizar algún día materia colapsada. Ésta no contiene electrones, o bien contiene electrones que están unidos de forma mucho más estrecha que los pertenecientes a la materia corriente. Es esta vinculación estrecha lo que le da a la materia su elevada densidad y su resistencia a la destrucción. Quizá sea posible inducir esta sólida unión y estabilizar esta forma de materia mediante factores ambientales distintos de la gravedad, por ejemplo, a través de fuerzas magnéticas de gran intensidad.

Los tipos conocidos de materia muy densa están constituidos por partículas subatómicas corrientes: neutrones, protones y electrones. Puede que existan otras partículas subatómicas estables y de una masa muy considerable. En tal caso, es posible que dichas partículas puedan utilizarse para producir formas muy densas de materia, que resultarían estables en la Tierra. Cualquier forma de materia que no contenga electrones sería extremadamente densa, y podría servir para este propósito.

Para que una forma de materia resulte utilizable no es necesario que posea una estabilidad absoluta. El carbono, en forma de diamante, es inestable, y acaba por convertirse en grafito. Sin embargo, tarda mucho tiempo, y mientras tanto, puede utilizarse el diamante. Quizás ocurra lo mismo en ciertos tipos de materia colapsada.

Si puede producirse y conservarse —al menos temporalmente— materia colapsada, tendría muchas aplicaciones además de su utilización como forma de protección para explorar

ambientes hostiles. Es posible que dicha materia pueda utilizarse como protección contra los efectos de una explosión nuclear; en consecuencia, es evidente que los estudios sobre cómo conseguir la utilización de la materia colapsada han de continuar de manera muy activa.

Otro enfoque al problema de la exploración de entornos hostiles implica diseñar instrumentos que se adapten a entornos distintos al de la Tierra. Todos los ambientes —por diferentes que sean del nuestro— contienen formas de materia relativamente estables. Por ejemplo, en las profundidades del Sol la forma estable de materia consiste en el plasma, donde se han separado los núcleos y los electrones. Es plausible el hecho de que logremos diseñar instrumentos que utilicen las formas de materia estables que haya en cada medio ambiente. Es preciso estudiar el problema referente a cómo observar las cosas que nos interesan, mediante la utilización de estos instrumentos adaptados a cada caso, pero no creo que se trate de algo insoluble.

La tecnología molecular

Acostumbramos pensar en la tecnología física como en algo que se lleva a cabo a gran escala, y que entraña la construcción de puentes, naves espaciales, pirámides y aceleradores de partículas. Sin embargo, estamos comenzando a explorar otra frontera de la tecnología física que quizás adquiera la misma importancia futura. En una conferencia pronunciada en 1959, con el título de «Hay mucho espacio en el fondo», el físico Richard Feynman sugirió una tecnología nueva, mediante la cual manejaríamos unidades mucho más pequeñas que las empleadas hasta ahora. En los años transcurridos desde dicha conferencia se ha avanzado algo en esta dirección, pero aún queda mucho camino antes de que lleguemos al «fondo».

Hasta ahora la tecnología humana ha implicado el empleo de objetos bastante grandes en comparación con los átomos individuales que forman la materia. Los tecnólogos químicos han logrado producir nuevos tipos de moléculas, pero no han sido capaces de disponer las moléculas en estructuras que permitan que la posición de cada molécula esté determinada por un plan global. El reducido tamaño de los átomos individuales, y la gran

cantidad de ellos que existe en un objeto de tamaño corriente, han hecho que parezca virtualmente imposible la ingeniería a nivel molecular. Sin embargo, esta ingeniería molecular se lleva a cabo de manera rutinaria hasta en los seres vivos más humildes durante su proceso de desarrollo. No disponemos aún de las técnicas adecuadas para ponerla en práctica. Pero tal situación está cambiando, y —sobre todo a través de los avances en la capacidad de utilizar radiación coherente de onda corta— también nosotros estaremos en condiciones de imitar los logros de las células que forman nuestro cuerpo, y de llevar a cabo esa ingeniería molecular.

Estas estructuras moleculares serán mucho más complejas que cualquier otra cosa que la tecnología humana haya logrado hasta el momento presente. La información contenida en las estructuras rivalizará y acabará por superar la existente en el material genético del organismo vivo más complejo. Además, la cantidad de elementos estructurales que poseen funciones individuales superará incluso la de los sistemas biológicos. Mediante esta «nanoingeniería» (término que utilizo para distinguir esta tecnología de la microingeniería actual), que funciona con combinaciones de miles de millones de moléculas, estaremos capacitados para producir sistemas con billones de elementos estructurales (mientras que la microingeniería implica simplemente miles o millones de elementos estructurales). Como regla general, cuantos más elementos operativos haya en un sistema, más complejas serán las tareas que desempeñen.

La nanoingeniería implicará la creación de diminutas estructuras con una complejidad sorprendente. Supongamos que la estructura es una rejilla, en la que cada intersección de la rejilla pueda estar ocupada por uno cualquiera de diez átomos distintos. La descripción de la rejilla consistiría en una lista de los lugares y de sus átomos correspondientes (fig. 27). Si la rejilla formase un cubo cuyas aristas midiesen cinco micras —el tamaño aproximado de una bacteria común— y el espacio entre los átomos fuese de medio nanómetro, la rejilla contendría un billón de lugares. Su descripción exigiría varios billones de «palabras». Esta cifra es aproximadamente igual a las que hay en todos los libros que se hayan escrito jamás, y la descripción contendría tanta información como el material genético de 20.000 personas. La construcción de la descripción sería por sí sola una tarea formidable. Ya estamos empezando a manejar y a almacenar

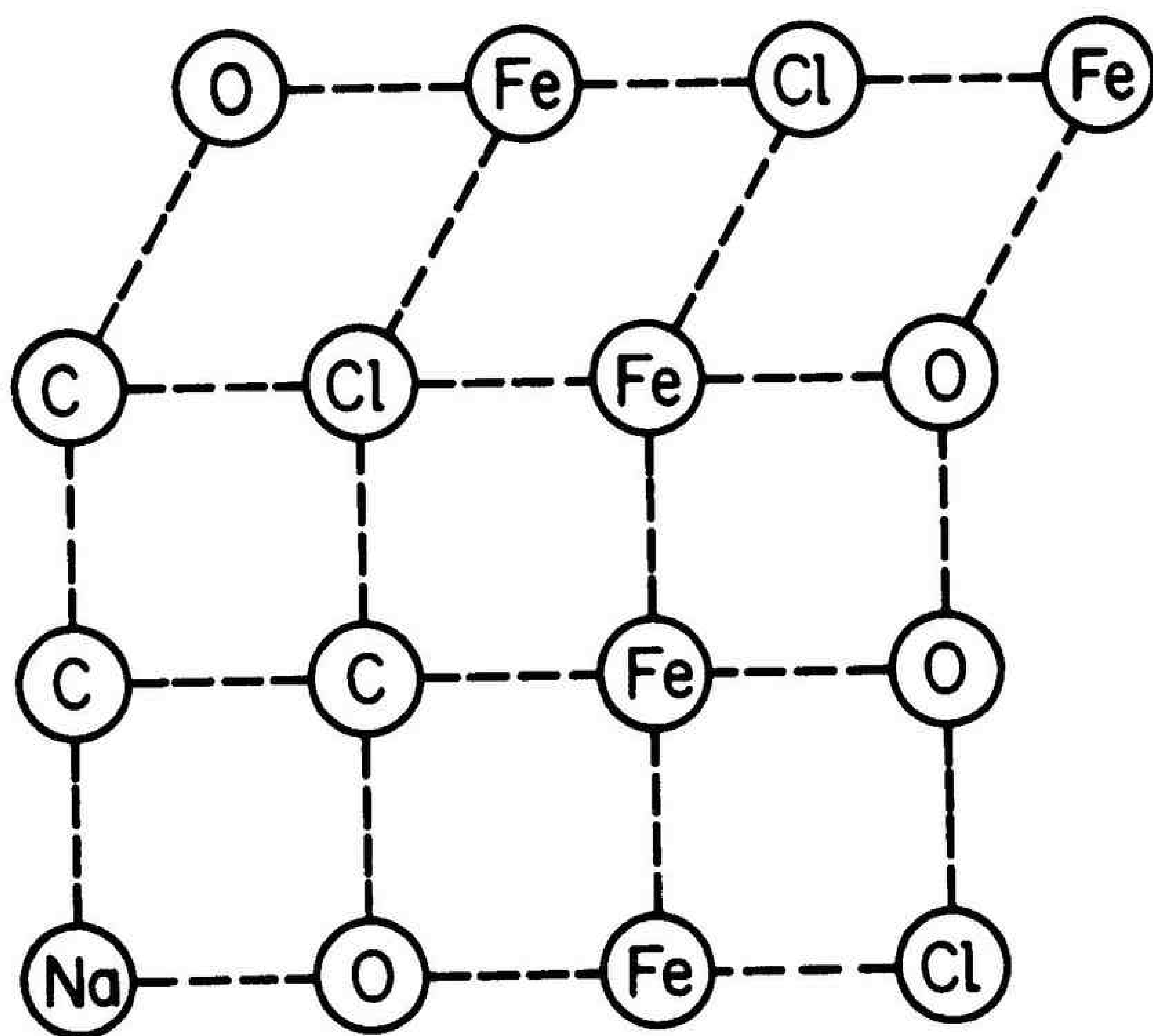


Fig. 27. Diagrama parcial de una estructura hipotética de nanoingeniería. El diagrama indica qué átomo hay que colocar en los diversos lugares de una rejilla cúbica.

estas cantidades de información en nuestra tecnología informática, y por lo tanto esto no constituirá un tropiezo importante que haya que superar en el desarrollo de estructuras moleculares.

A través de la nanoingeniería podrían satisfacerse diversas necesidades tecnológicas. Una de ellas es el desarrollo de nuevos materiales, con propiedades muy deseables: por ejemplo, una extremada fortaleza. Los materiales actualmente existentes se rompen ante un esfuerzo relativamente bajo debido a que

dentro del material hay pequeñas regiones donde los átomos que lo componen se hallan alineados de forma inadecuada. Si controlásemos el orden de los átomos individuales, podríamos eliminar tales «dislocaciones», y aumentaríamos la fortaleza de los materiales corrientes muchos miles de veces. La disponibilidad de estos materiales superfuertes permitiría importantes aplicaciones en ingeniería estructural. Si los cables de soporte de los puentes colgantes estuviesen hechos con dichos materiales, sólo tendrían unos cuantos milímetros de espesor, y no metros, como en la actualidad. Los cables podrían tener miles de kilómetros de longitud sin romperse debido a su propio peso, y quizá podrían emplearse como medio de transporte desde una superficie planetaria hasta una estación espacial o incluso desde la Tierra a la Luna. Asimismo, los materiales corrientes superfuertes podrían sustituir a materiales decisivos como por ejemplo el manganeso o el platino, aliviando su escasez.

Otra aplicación plausible de la nanoingeniería consistiría en la construcción de microsensores que podrían implantarse en el cuerpo humano. Podrían permanecer allí durante largos períodos, supervisando las diversas funciones fisiológicas, desde las moléculas subcelulares hasta los tejidos y los órganos. Esta información sería de un inmenso valor científico. Por primera vez conoceríamos en detalle, y de forma continuada, cómo funcionan las diversas partes de un organismo complejo. Una información de esta clase serviría de clave esencial para determinar algunos de los mecanismos implicados en el crecimiento y el envejecimiento. Además, después de haber recogido la información durante un tiempo determinado, estos datos podrían utilizarse como criterio de base, y las desviaciones del funcionamiento normal provocadas por la enfermedad se podrían detectar en una fase muy precoz, cuando quizá resultase fácil corregirlas.

Antes de que podamos utilizar microsensores hay que solucionar diversos problemas. Es probable que haya pocas personas dispuestas a someterse a múltiples intervenciones quirúrgicas para satisfacer la curiosidad de los científicos, aunque la información que se obtenga prometa grandes beneficios. Sin embargo, pueden descubrirse técnicas a través de las cuales los sensores se envíen a un tejido específico; después de ser ingeridos, inhalados o inyectados, serían transportados por los mecanismos corporales ordinarios hasta el lugar deseado, donde se implantarían por sí mismos, automáticamente. Se plantean tam-

bién los problemas afines del posible daño que la presencia del sensor provoque al cuerpo, y la acción del sistema inmunológico del cuerpo con el propósito de expulsar el sensor. Pero estas dificultades probablemente tampoco serán insuperables.

Otro problema de importancia consistirá en conseguir que la información recogida por los sensores salga al exterior, donde pueda evaluarse. Quizá se logre diseñar sensores que emitan su información como impulsos de radiación de microondas, a la que el material vivo es relativamente transparente. Esta radiación sería detectada y descodificada en el exterior del organismo.

La nanoingeniería es una tarea para el futuro, pero ya hemos hecho progresos que nos permiten salvar el abismo de ingeniería que existe entre nosotros y las moléculas. La microingeniería ya se utiliza en el diseño de microcomputadores. En estos diseños se fabrican de manera normal estructuras cuyos elementos individuales —con un tamaño de una micra o incluso menos— se colocan en la disposición deseada (fig. 28). Esto se lleva a cabo mediante numerosas técnicas. En una de ellas, conocida con el nombre de litografía, se imprime un patrón sobre una superficie protegiendo con una máscara opaca determinadas partes seleccionadas de la superficie. A continuación, se emite la radiación a través de los huecos de la máscara, con objeto de exponer un material sensible que se encuentra en la superficie, y luego se elimina el material expuesto por medios químicos o de otra clase.

La precisión con que pueda hacerse esto depende de muchos factores, entre los que se cuenta la longitud de onda de la radiación utilizada. Con luz visible o ultravioleta, pueden realizarse patrones que tengan una precisión de aproximadamente una micra. Para lograr patrones más precisos, y para hacer la máscara opaca, pueden utilizarse rayos X y haces de electrones. Si se extienden las técnicas de la litografía mediante el empleo de haces intensos de radiación de onda corta probablemente aumente nuestra precisión hasta el punto de que puedan producirse patrones más pequeños que los virus, es decir, de unos cuantos nanómetros de largo.

Existen varios enfoques distintos de la ingeniería molecular. Uno de ellos implica la ampliación de métodos que ya se utilizan en microingeniería; la nanolitografía expuesta hace un momento es sólo una de las técnicas posibles. El enfoque de la «extensión» podría implicar el uso de sondas externas —por ejemplo, haces de electrones o haces de rayos X— para configurar el material carente de forma según la disposición molecular que se desee. (Para esto no pueden utilizarse haces de luz visible porque su longitud de onda es demasiado larga. Sería como tratar de fabricar un reloj utilizando un *bulldozer*.)

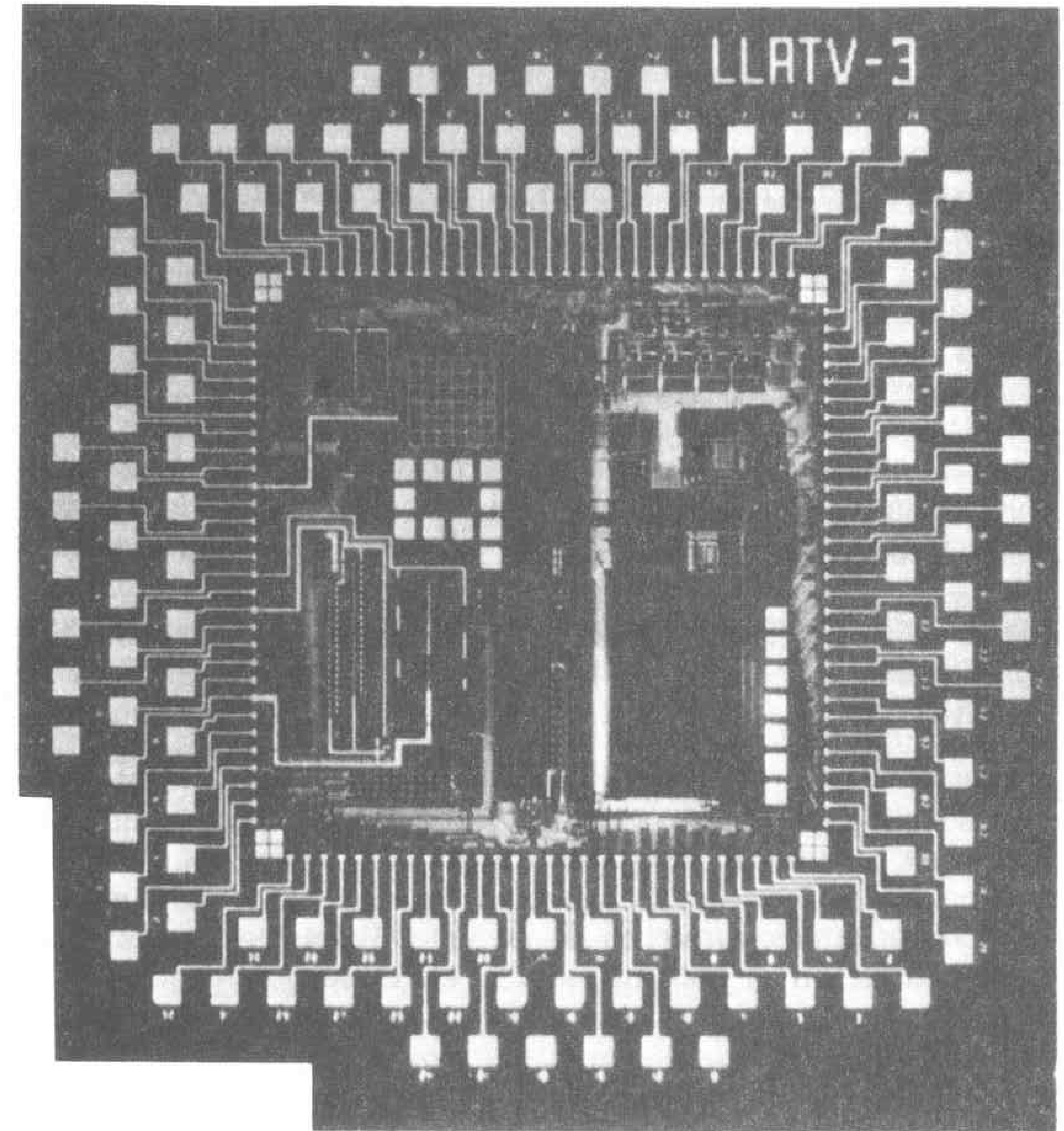


Fig. 28. Estructura de microingeniería. Chip de computador que contiene conmutadores lógicos y otros circuitos. El chip tiene una longitud total de 4 milímetros, y algunos de los canales a través de los cuales fluyen los electrones tienen una longitud de una micra.

Quizá sea posible extender algunos de los método. utilizando la radiación coherente de onda corta que se describió en el capítulo 5, tanto para la «nanofabricación» como para ver qué es lo que estamos haciendo en el nanomundo, ya que puede utilizarse la microholografía para ampliar los patrones o para reducirlos. Este patrón reducido podría imprimirse en una capa previamente ordenada de material, empleando las técnicas descritas antes. Incluso sería posible transportar átomos de forma selectiva hasta un lugar determinado de una superficie, acelerándolos mediante haces de radiación coherente de onda corta. Este enfoque exigirá que se fabrique una fina capa tras otra, porque estas sondas externas son de la máxima eficacia cuando actúan sobre la superficie de los objetos.

En su conferencia sobre nanoingeniería, Feynman indicó también otro enfoque de la cuestión. A lo largo de una serie de etapas, podríamos construir pequeñas herramientas que se utilizarán para manejar objetos todavía más pequeños, con los que a su vez se fabricarían herramientas aún más diminutas, hasta llegar al nivel molecular. Este enfoque podría resultar más factible si algunas de las microherramientas llevan incluido un computador que les permita controlar el manejo de las moléculas. Los tiempos de reacción del ser humano pueden ser demasiado lentos para controlar directamente los procesos moleculares.

Un tercer enfoque se basaría en los procedimientos a través de los cuales las bacterias y otros seres vivos producen las moléculas que emplean en sus procesos vitales. Fabrican la proteína mediante una larga cadena de aminoácidos que a continuación se pliega sobre sí misma para adquirir la disposición tridimensional necesaria. Este plegamiento no tiene lugar a través de una acción que lleve a cabo la bacteria, sino como consecuencia del funcionamiento de las leyes físicas sobre la cadena de proteínas en el entorno celular en el cual se produjo. Las proteínas no son la única clase de sustancias que, una vez que han sido fabricadas con una composición molecular adecuada, se configuran a sí mismas «automáticamente» en la forma correcta para llevar a cabo una función. Lo mismo hacen algunos de los componentes de los seres inanimados, por ejemplo, los átomos de una aleación metálica.

Todavía no sabemos lo suficiente acerca de los procesos físicos a nivel de grandes moléculas como para estar en condicione de predecir con precisión las disposiciones físicas que adoptarán, pero éste no es un problema imposible de solucionar. Una vez que hayamos comprendido cómo y por qué las biomoléculas se configuran a sí mismas en tres dimensiones, lograremos extender esta comprensión a las moléculas creadas por nosotros. En consecuencia, podremos evitar algunos de los problemas que involucra el especificar dónde es preciso colocar cada uno de los billones de átomos.

Es posible incluso que las variantes de las biomoléculas mismas nos resulten útiles. Puede existir una cantidad enorme de polímeros, y sólo unos cuantos de éstos desempeñan una función biológica en alguna forma de vida. Otros polímeros, con cadenas sumamente específicas de monómeros, podrían utilizarse para objetivos no biológicos. Por ejemplo, se ha sugerido que ciertos polímeros orgánicos podrían manifestar una conductividad eléctrica muy elevada, y por lo tanto, podrían sustituir a los conductores metálicos. Si resulta que los polímeros orgánicos tienen de hecho estos valiosos usos, es probable que podamos «entrenar» a los seres vivientes —a las bacterias, por ejemplo— para que produzcan para nosotros los nuevos polímeros orgánicos, sin que tengamos que llevar a cabo la ingeniería molecular.

La nanoingeniería posee dos aspectos prometedores para la tecnología del futuro. Uno de ellos es la construcción de objetos de una complejidad previamente inimaginable, con una extensa gama de capacidades que surgen de dicha complejidad. La otra consiste en el rediseño de materiales mediante el control de las colocaciones atómicas individuales. Estas promesas se llevarán a cabo de diversos modos, configurando nuestra tecnología física hasta un punto imposible de prever en la actualidad.

LA BIOTECNOLOGÍA

El tipo más importante de la tecnología del futuro involucrará el manejo de la materia viviente, sobre todo las células humanas, y no de la materia inorgánica, como hace la tecnología física. Es conveniente referirse a esta nueva tecnología con el nombre de biotecnología, en vez de denominarla apelando a alguna de sus manifestaciones específicas, por ejemplo la ingeniería genética o el ADN recombinante.

Como la ciencia biológica no posee aún una comprensión de su contenido tan profunda como en el caso de la física y la

química, la biotecnología se encuentra en un estadio relativamente primitivo. No obstante, en su futuro se incluirá la capacidad de modificar los aspectos más fundamentales de la vida humana, por ejemplo, el envejecimiento, la sexualidad, las desigualdades innatas y la conducta sociopática. Entre los futuros avances de la tecnología física es probable que sólo los que ocurran en la inteligencia artificial puedan rivalizar con la biotecnología en el influjo que ejerzan sobre la vida humana.

Un tipo importante de biotecnología consiste en la ingeniería genética, que es la alteración de la información genética para modificar una función celular o corporal. Por ejemplo, ciertas enfermedades parecen implicar una mutación en un gen particular. Tenemos excelentes razones para creer que, a medida que avancen las técnicas, estaremos en condiciones de devolver el gen a su forma normal y eliminar la disfunción que implica la enfermedad.

Dentro del marco de la ingeniería genética existe una distinción ulterior: entre los cambios producidos en las células embrionarias —que sólo afectarán a las generaciones futuras— y los cambios en las células somáticas, que afectan al organismo viviente. Es probable que este segundo tipo de cambio resulte más difícil, puesto que implicaría cambiar una gran cantidad de células mientras se mantiene funcionando el organismo.

La inducción de un cambio a través de células embrionarias no es un fenómeno nuevo; a lo largo de milenios se ha practicado la cría selectiva de plantas y de animales. Esta forma de tecnología nos ha permitido explorar la amplia gama de variaciones naturales que existen en el material genético de cualquier especie, y producir seres vivos que tengan las características que apreciamos. Algunas de las variaciones que se expresan a través de la cría selectiva son muy notables. Por ejemplo, los perros varían de peso entre 1 y 100 kilos, y sin embargo siguen siendo miembros de una misma especie.

A pesar de todo, existen límites a lo que pueda lograr la cría selectiva, que no hace más que mejorar características que ya están presentes en una especie. Si un rasgo exige proteínas que sean codificadas por secuencias de ácido nucleico que no se encuentran en los genes de ningún miembro de determinada especie, esta característica no suele poder introducirse mediante la cría selectiva. Por ejemplo, los seres humanos no pueden sintetizar ocho de los aminoácidos que aparecen en las proteínas de nuestras células. Para vivir hemos de consumir proteínas que contengan dichos aminoácidos. Supongamos que decidiésemos que es deseable producir seres humanos que puedan sintetizar esos aminoácidos en su propio cuerpo. Tales personas podrían vivir con una dieta mucho más sencilla que la nuestra. Para conseguirlo, sería necesario utilizar métodos diferentes a la cría selectiva.

Ya existen técnicas para alterar partes específicas de la secuencia de ADN, por lo menos en condiciones de laboratorio. Las sustancias conocidas como enzimas de restricción pueden alterar químicamente el ácido nucleico de manera que la secuencia se corte en determinado punto, y otros enzimas puedan introducir una nueva subsecuencia específica en la cadena de ácido nucleico, allí donde se efectuó el corte. La nueva secuencia provocaría entonces una alteración en la función de la célula que la contiene. Será más fácil llevar a cabo tal cosa en una célula embrionaria o en una célula fecundada, que luego podría implantarse y desarrollarse con normalidad.

Esto sería más difícil de lograr en las numerosas células de un órgano de una criatura viva multicelular —ya que implicaría cambiar su actual funcionamiento celular—, pero en el futuro estaremos en condiciones de conseguirlo. Las futuras micromáquinas y nanomáquinas —implantadas en el organismo— tendrán el tamaño adecuado para manejar células individuales y partes de células, y por lo tanto se podrán utilizar para llevar a cabo reconstrucciones subcelulares sin perturbar de modo considerable el organismo en su totalidad. De manera alternativa, quizá consigamos que haya virus dedicados a transportar selectivamente nuevo material genético en las células adecuadas de los organismos vivos. Los virus ya llevan a cabo esta función para sus propios objetivos de reproducción, y conseguiremos inducirlos a que empleen su técnica a nuestro servicio.

Sin embargo, incluso cuando existan dichas técnicas, seguirá habiendo una barrera enorme ante muchos tipos de biotecnología genética eficaz. Esta barrera surge debido a nuestra limitada comprensión de la compleja relación que existe en los organismos superiores entre el mensaje codificado en la secuencia de ADN y la forma en que este mensaje se halla representado en la función de la célula y en la conducta del organismo. Ni siquiera llegamos a entender esto a nivel de las células individuales. Hace poco se ha descubierto que el ADN de algunas células

cancerosas humanas difiere del que pertenece a la correspondiente célula normal únicamente en una base situada en un solo punto de la secuencia de ADN. Esto constituye la diferencia más sencilla que cabe imaginar. Sin embargo, nadie ha logrado comprender hasta ahora cómo es que esta pequeña variación se manifiesta en las muchas diferencias que existen entre las células normales y las células cancerosas, por ejemplo, la limitada división potencial de aquéllas en comparación con la ilimitada división potencial de estas últimas.

Hay muchas formas de biotecnología; sus implicaciones poseen un alcance tan vasto que no aspiro a exponerlas aquí en profundidad. En un futuro muy cercano, las formas de biotecnología humana son la curación o la eliminación de las enfermedades genéticas y el control de aspectos reproductivos tales como el sexo y la cantidad de los hijos. Probablemente las otras formas de biotecnología humana se hallan más lejanas, pero deseo exponer brevemente dos de ellas: la formación de nuevos órganos y el control del envejecimiento.

Un método para la formación de órganos —genéticamente idénticos o muy semejantes a los propios de una persona— podría garantizar un trasplante con éxito cuando el órgano original fuese destruido por la enfermedad o una lesión. Estos trasplantes no estarían sometidos a la reacción inmunológica que obstaculiza los actuales trasplantes de órganos extraños. El desarrollo de esta técnica eliminaría también el problema de la escasez de órganos para trasplantes.

Una vez que los biólogos comprendan la forma en que tiene lugar normalmente el proceso de desarrollo, será posible que dicho proceso se induzca artificialmente, utilizando células tomadas de un cuerpo individual, que contengan toda la información genética empleada originariamente para producir el órgano. Quizá sería necesario que algunas células retrocedan al estado indiferenciado que tenían al principio de la embriogénesis; o es posible que descubramos que en los adultos hay normalmente células capaces de volverse a desarrollar. Quizá se tomarán de forma rutinaria unas cuantas células de tipos diferentes —de todos los sujetos humanos— durante el período infantil o de gestación, y se conservarán a baja temperatura hasta que se necesiten para crear nuevos órganos. Este tipo de conservación ya puede llevarse a cabo con pequeñas cantidades de células.

El proceso de formación de nuevos órganos podría tener lugar dentro del cuerpo de la persona o en un medio artificial externo. Dentro del cuerpo se dan los métodos naturales para nutrir e integrar un órgano en crecimiento. Sin embargo, quizá resulte difícil evitar las interferencias con las funciones de los demás órganos mientras estén creciendo dentro del cuerpo un corazón o un hígado nuevos. El empleo de un medio externo evitaría el problema, aunque puede hacer más difícil que el órgano se desarrolle con normalidad. Incluso ahora, pueden alimentarse y conservarse durante períodos breves —utilizando aparatos especializados— órganos que han sido quitados de un cuerpo, y es probable que dichos aparatos puedan adaptarse para permitir el crecimiento de órganos. Por supuesto, sería necesario implantar quirúrgicamente el órgano maduro, pero esto no plantea grandes problemas.

Sería posible incluso mejorar el órgano original, y a pesar de todo evitar el rechazo. Por ejemplo, si el órgano original había desarrollado un tumor debido a un defecto identificable —de tipo genético o de otra clase—, en el nuevo órgano se podría eliminar ese defecto antes de implantarlo. Este tipo de terapéutica de sustitución mejoraría las consecuencias negativas del proceso de envejecimiento. Un hombre de cincuenta años de edad podría estar tan saludable como cuando tenía veinte años, si sus órganos gastados fuesen reemplazados por nuevas copias mejoradas.

La posibilidad de sustituir órganos no se extiende al sistema nervioso central. En este caso la técnica más probable consistiría en inducir la regeneración de las partes dañadas del cerebro y de la medula, al mismo tiempo que se conservan las memorias almacenadas en las partes no dañadas del cerebro y las conexiones llenas de complejidad que caracterizan al sistema nervioso maduro. Para lograr esta tecnología regenerativa quizá no haya que entender todos los aspectos del desarrollo. La regeneración de los nervios periféricos ya sucede de forma espontánea en los seres humanos, y en los anfibios tiene lugar la regeneración de miembros. Lo que probablemente se necesita para que se haga posible la regeneración del sistema nervioso central y de los miembros es una comprensión más profunda de los mecanismos del crecimiento en los organismos adultos.

Una tecnología que sirva para formar nuevos órganos y para regenerar los viejos ayudaría a aliviar muchos de los problemas

de salud que actualmente no pueden recibir tratamiento, por ejemplo, las enfermedades degenerativas del sistema nervioso central. Esta tecnología asumirá igual importancia en las enfermedades que ya podemos someter a tratamiento, por ejemplo, la insuficiencia renal, cuyo costo terapéutico es muy oneroso para nuestro sistema de servicios médicos. Sin embargo, incluso esta tecnología dejará tal como está el problema de la pérdida de función biológica que tiene lugar como consecuencia del proceso de envejecimiento.

El ciclo vital humano probablemente podría ampliarse en cierta medida a través de una serie de trasplantes de órganos. No obstante, para que nuestra esperanza de vida aumente de forma sustancial, hemos de encontrar un modo de frenar y de invertir el proceso de envejecimiento en sí mismo considerado. Una terapéutica antienvejecimiento podría surgir gracias a una comprensión de las causas y los mecanismos del envejecimiento, o a través de descubrimientos efectuados por azar. Sea como fuere, a partir de lo que ya conocemos acerca del envejecimiento cabe prever algunos aspectos de la terapéutica antienvejecimiento.

Como nos muestra la figura 29, los efectos deletéreos del envejecimiento comienzan a los cuarenta años de edad o incluso antes, de manera que una terapéutica antienvejecimiento tendría que comenzar en una fase temprana de la existencia. Lo que tiene lugar es un proceso global, por lo menos a nivel del organismo, y por eso una auténtica terapéutica antienvejecimiento habrá de tratar la causa global del envejecimiento, más bien que sus consecuencias para los órganos individuales. Lo fácil que resulte tal cosa dependerá de las causas y mecanismos efectivos del envejecimiento.

Uno de los efectos del proceso de envejecimiento consiste en una disminución de la capacidad para resistir a diversas enfermedades. Como consecuencia, la tasa de mortalidad aumenta rápidamente con la edad, y la máxima duración de la vida humana se halla en torno a los 120 años. Nada de lo que hemos hecho hasta ahora ha provocado un cambio en este ciclo vital máximo. Evitando o curando numerosas enfermedades individuales, hemos logrado aumentar el ciclo vital humano promedio (o la esperanza de vida) hasta su valor actual de unos 75 años, en muchos países. Sin embargo, resulta improbable que este

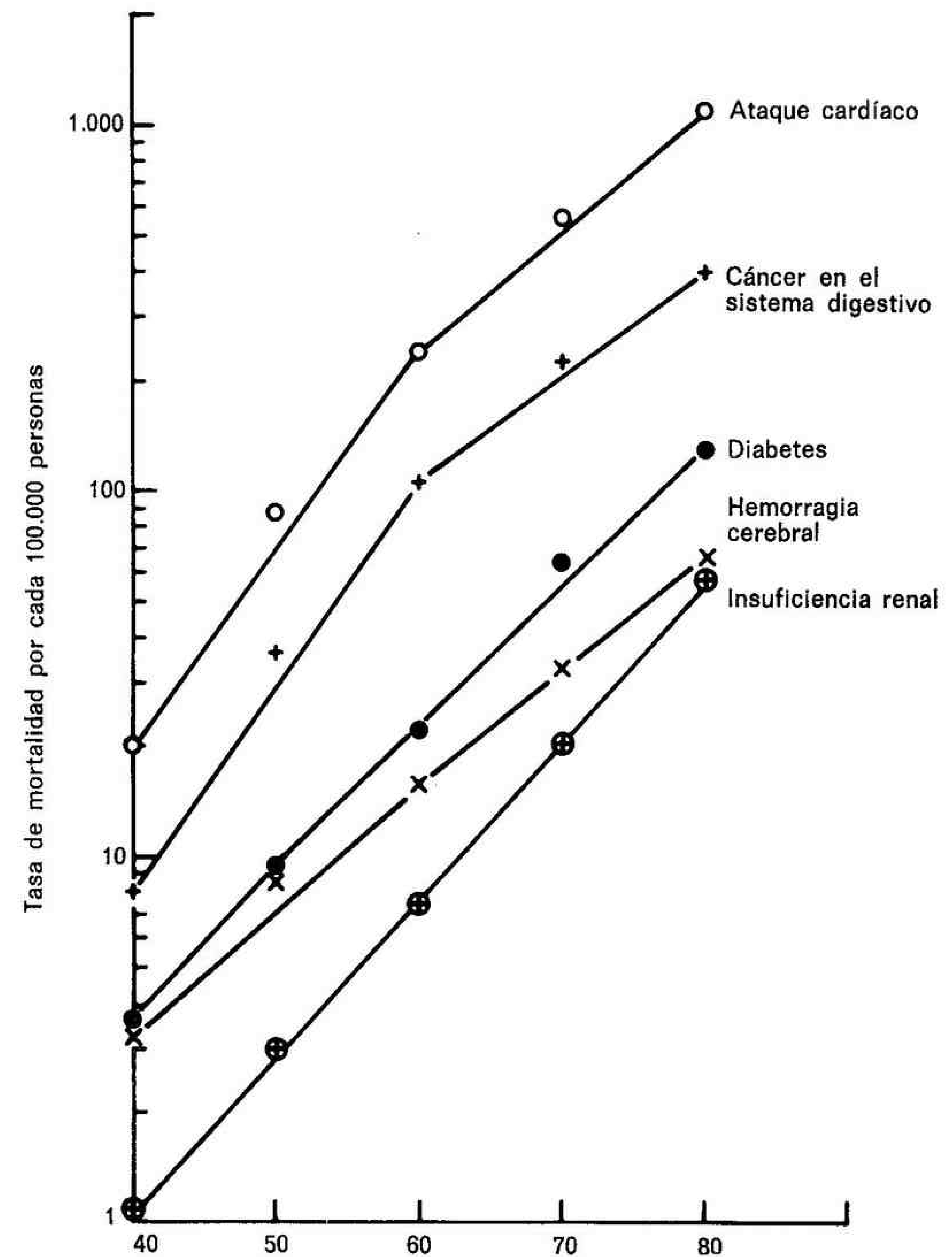


Fig. 29. Tasa de mortalidad por enfermedad en comparación con la edad. Se puede comprobar el rápido incremento que muestran —al ir aumentando la edad— las tasas de mortalidad correspondientes a diversas enfermedades importantes.

enfoque de la cuestión amplíe mucho más la duración media de la vida. Puesto que la tasa de mortalidad causada por muchas enfermedades diferentes aumenta tan rápidamente junto con la edad, aunque se eliminasen una o varias de las actuales causas más importantes de muerte entre las personas de edad, continuaríamos muriendo de otras enfermedades que no hubiesen sido eliminadas.

A cualquier edad, la tasa de mortalidad es producto de dos factores. Uno de ellos es un factor de vulnerabilidad, que mide la cantidad de causas diferentes de muerte, y que se muestra relativamente constante después de los 30 años de edad. El otro factor mide las consecuencias del envejecimiento. Este factor por sí solo lleva que la tasa de mortalidad se duplique cada siete años adicionales de vida. En base en el segundo factor podemos inferir una tasa de envejecimiento, tal como la mide la tasa de mortalidad. Esta tasa de envejecimiento ha cambiado poco a lo largo del período sobre el cual poseemos información. De hecho, durante la última década —en la cual la esperanza de vida ha aumentado de forma significativa— la tasa de envejecimiento inferida a partir de la tasa de mortalidad ha aumentado ligeramente, ya que el aumento en la esperanza de vida ha sido provocado por un descenso en el factor de vulnerabilidad. Por desgracia, el ciclo vital máximo se muestra muy insensible a los cambios en el factor de vulnerabilidad.

Por otro lado, un tratamiento que haga más lento el ritmo de envejecimiento casi con seguridad provocaría un aumento en el ciclo vital promedio y en el ciclo vital máximo. Por ejemplo, si la tasa de envejecimiento después de los 30 años se redujese uniformemente en un 10 %, se añadirían diez años al ciclo vital máximo, y varios años al ciclo vital promedio. Además, las personas vivirían con una salud relativamente buena estos años adicionales de vida. Es evidente que el método que tenemos que usar para aumentar de modo significativo el ciclo vital humano es el control del proceso de envejecimiento en sí mismo.

Lo que podamos hacer con respecto al envejecimiento depende de cómo y por qué ocurre éste. Si el envejecimiento se debe a una disfunción en un sistema orgánico específico —por ejemplo, el sistema inmunológico—, la comprensión del mecanismo de esta disfunción nos permitirá corregirla, como hemos logrado en el caso de otras diversas disfunciones orgánicas. Aquí el control del envejecimiento se convertiría de hecho en parte de la práctica médica ordinaria. Sin embargo, es posible que este tratamiento del fenómeno resulte caro, lo cual provocaría un considerable problema social. Es improbable que los pobres acepten una situación en la cual los ricos puedan llegar a comprar incluso un alejamiento de la muerte, mientras que ellos no pueden. No obstante, creo que éste es el escenario más improbable, simplemente porque los hechos característicos del envejecimiento no se muestran muy coherentes con la idea de que se deba a una disfunción orgánica específica.

Es más probable que el envejecimiento primario tenga lugar a nivel celular. Una de las posibilidades es que el envejecimiento de las células constituya una especie de fase terminal programada, dentro del proceso de diferenciación de algunas células del cuerpo o de todas, en la cual cambian de un modo que ya no les permite dividirse o funcionar eficazmente. Si esto fuese así, el envejecimiento celular sería una parte del desarrollo en sí mismo. Entonces, frenar el proceso de envejecimiento formaría parte de una tecnología más general, que sirva para influir en diversos aspectos del desarrollo. En el momento presente no estamos capacitados para ponerla en práctica, pero el enfoque no deja de abrir esperanzas. Una vez que hayamos comprendido los mecanismos a través de los cuales tiene lugar la diferenciación celular, es posible que encontremos la manera de modificar las consecuencias de estos mecanismos, cambiando así el ritmo en que tiene lugar el desarrollo. El hecho de que las células diferenciadas puedan ser transformadas por diversos agentes de un modo en el cual crecen y se dividen indefinidamente —tanto en los cultivos celulares como en los organismos— nos sugiere que es factible esta modificación controlada de la diferenciación terminal. La infatigable célula cancerosa no sólo constituye un desafío que la medicina ha de superar, sino también una de las claves para un eventual triunfo sobre el envejecimiento.

También es posible que el envejecimiento celular no esté programado, pero que ocurra debido a la acumulación de errores en el metabolismo celular. La variedad de ciclo vital entre las distintas especies quizás implique una tasa diferente de errores de esta clase, o una diferencia en la reparación de los errores o en la tolerancia del organismo ante ellos. Si este modelo del envejecimiento es el correcto, sería difícil hacer algo para controlar el proceso de envejecimiento. Pronto conoceremos cuál de estos escenarios es el adecuado, y si existe alguna perspectiva

de que se convierta en realidad un sueño de la humanidad que se remonta —de forma documental— hasta el poema de Gilgamesh.

Los futuros avances en nuestra comprensión de los procesos biológicos nos permitirán modificar nuestras actuales funciones biológicas e introducir otras nuevas. La biología ya no constituirá algo impuesto por el destino. Tendremos el poder de hacer lo que queramos con nosotros mismos.

Esta posibilidad nos obligará a enfrentarnos con opciones éticas de enorme trascendencia, entre las que se cuenta el dedicarse o no a remodelar la especie humana. Resulta esencial que estas decisiones se tomen a la luz de un examen completo de nuestras esperanzas acerca del futuro de la humanidad y de la biosfera. No debemos rechazar la perspectiva de mejorar nuestra especie apelando a frases de impacto como «¡No hay que interferir para nada en la naturaleza!» o «¿Quién va a hacer de Dios?»

Los procesos naturales no poseen una sabiduría intrínseca. La naturaleza que hemos heredado es producto de innumerables accidentes que han tenido lugar a lo largo de 4.000 millones de años. Es preciso que comprendamos estos procesos antes de que podamos alterarlos de manera sensible, pero no debemos rendir culto al actual carácter biológico de nuestra especie, como no rendimos culto a los ídolos de bronce que nuestros antepasados veneraban. Tampoco debemos dar la espalda a las cuestiones morales que plantea la biotecnología ni a las magníficas oportunidades que ofrece.

9. EL FUTURO MODELO DE LA CIENCIA: NUEVOS PROCEDIMIENTOS DE BÚSQUEDA

Hace sólo cincuenta años había una décima parte de los científicos que existen hoy. En la actualidad hay en los Estados Unidos aproximadamente 250.000 físicos y biólogos dedicados a la investigación, y quizá haya un millón en todo el mundo, cifras que crecen cada año en un porcentaje significativo. En los últimos años se ha producido un aumento todavía más considerable en la cantidad de científicos que trabajan en países menos desarrollados, muchos de los cuales se han formado en los países desarrollados. Es probable que los países menos desarrollados constituyan la fuente principal de los futuros aumentos en la cantidad de científicos.

La ciencia también ha prosperado gracias a la inmensa cantidad de recursos que las naciones dedican a la investigación científica. En la actualidad, los gastos en investigación básica ascienden a unos 10.000 millones de dólares anuales en los Estados Unidos, y en todo el mundo se elevan al triple de esa cifra. Hace dos generaciones tales gastos se medían en miles de dólares, y no en miles de millones.

Este notable cambio en el alcance de la investigación científica provocó un cambio cualitativo en la vida de trabajo de los científicos. Estos cambios son muy apreciables en el caso de la física, donde tuvo lugar por primera vez el incremento de los gastos gubernamentales, pero ahora también se advierten en otros campos, por ejemplo, en biología. Los cambios que ya han tenido lugar han convertido el proceso cotidiano de la mayoría de las investigaciones científicas en algo muy diferente de

lo que era antes de la Segunda Guerra Mundial (que señala la línea divisoria entre la antigua y la nueva era del apoyo a los científicos). El proceso de cambio es continuado, y hará que el tipo de trabajo de los científicos del futuro sea muy distinto al de los actuales.

LA CIENCIA EN GRUPO

Un cambio esencial con respecto al pasado reciente, en lo que tiene que ver con la forma en que se realiza la investigación científica, consiste en que ahora —con mucha frecuencia— un único proyecto involucra gran cantidad de científicos que colaboran entre sí; a veces pueden ser varios cientos. Estos colaboradores quizá se hallen en laboratorios dispersos por todo el mundo, y nunca lleguen a reunirse en cuanto grupo. Esta situación se da sobre todo en la física experimental de las partículas subatómicas. No obstante, incluso en algunas áreas de la ciencia teórica, no resultan infrecuentes los artículos escritos por cuatro autores o incluso más. Ello contrasta con la situación no demasiado lejana en la que una investigación científica determinada era en gran medida la obra de un científico individual. Muchos científicos rara vez se reunían con otros científicos, excepto en congresos o durante visitas ocasionales a otros laboratorios.

En cierto grado, esta autoría multiplicada es consecuencia de necesidades reales que se dan en el seno de la ciencia. Por ejemplo, si un experimento entraña el análisis de un gran volumen de datos, a menudo es necesario que varios grupos se dediquen a analizarlos en paralelo. También existen experimentos que implican tantas tareas científicas diferentes que resulta razonable dividirlas entre muchos grupos, cada uno de los cuales se especializa en una sola tarea. No cabe duda de que muchos experimentos en la física de las partículas serían difíciles o imposibles de hacer sin tal subdivisión de tareas. Sin embargo, también hay otras razones para la colaboración, razones que no siempre ayudan al avance de la investigación científica.

En algunos campos de experimentación científica, por ejemplo, en la física de las partículas y en la radioastronomía, la posibilidad de efectuar experimentos se halla limitada por la disponibilidad de instrumentos complejos, que sólo pueden ser empleados por un reducido número de científicos en un momento determinado. Como consecuencia, entre los científicos se da una competencia enorme para tener acceso a dichas instalaciones. Para lograr tal acceso, a menudo es necesario redactar una detallada propuesta previa acerca de la investigación que se va a realizar, y de lo que los científicos esperan aprender gracias a ella. Originariamente, los científicos tuvieron que convencer a la opinión pública de que era conveniente dedicar fondos a la construcción de un centro de investigación. Sin embargo, una vez que éste ha sido construido, el acceso a él se halla controlado por otros científicos, a los cuales hay que convencer con razones científicas y no sociales.

En esta competencia para lograr dicho acceso, a menudo ocurre que varios grupos de científicos efectúan propuestas semejantes, porque sólo suele haber unos cuantos experimentos que haya que realizar en una etapa determinada de una ciencia. Los encargados de decidir acerca del acceso a menudo unifican varios grupos, para no marginar a nadie y para optimizar los fondos disponibles. De manera alternativa, un grupo de científicos que no esté seguro de obtener un acceso a los recursos en cuestión puede unirse a un grupo más fuerte, intercambiando una opción pequeña de logro individual por una opción mayor como parte de un conjunto más amplio. A menudo estas estrategias conducen a la formación de grupos innecesariamente numerosos de científicos que colaboran entre sí. Hace poco un comité de físicos europeos tuvo que decidir quién tendría acceso al nuevo acelerador de partículas que se construye en Suiza. La decisión implicó la formación de grupos con centenares de físicos, procedentes de numerosos países, que colaborarán en el empleo del acelerador.

En áreas de la ciencia distintas de la física de partículas y de la astronomía, son mucho menos frecuentes los grupos experimentales demasiado numerosos. A pesar de ello, ha habido un giro notable hacia los grupos de investigación más numerosos en casi todos los terrenos. Los grupos suelen estar formados por uno o varios científicos de más edad, unos cuantos científicos más jóvenes que han obtenido recientemente su doctorado, y un número mayor de posgraduados. También puede haber técnicos que formen parte del grupo. A menudo el resultado de la actividad del grupo se publica conjuntamente como producción global del laboratorio, y a veces resulta difícil saber quién es el responsable real de determinada investigación específica. En la

ciencia experimental ha quedado del todo obsoleta la imagen del científico como trabajador solitario que busca la verdad en un laboratorio aislado.

La colaboración puede constituir una experiencia extremadamente gratificante. La necesidad de explicar con coherencia las propias ideas a un compañero de equipo interesado en la cuestión ayuda a perfeccionar las nociones. Además, los compañeros de equipo sirven para dar apoyo psicológico en los momentos críticos, mientras se está resolviendo un problema difícil. En mi propia carrera he podido constatar que dicho refuerzo psicológico ha resultado esencial en muchas ocasiones.

Muchas otras áreas científicas tomarán la misma dirección que la física de partículas experimental, y llevarán a cabo complejos experimentos en grupo. Si los biólogos —por ejemplo— logran disponer de herramientas nuevas y notablemente más caras, también realizarán sus investigaciones en grandes laboratorios nacionales internacionales, como los físicos y los astrónomos.

El que la física continúe avanzando en la dirección de grupos investigadores aún más numerosos, que trabajen en laboratorios aún más grandes, depende de los futuros descubrimientos y de lo que éstos nos indiquen acerca del mundo. Los físicos de partículas están construyendo aceleradores que —junto con los correspondientes detectores— emplearán a grupos de centenares de científicos procedentes de muchos países. A medida que se incrementa el costo de los aceleradores, disminuye la cantidad de instalaciones que se puede construir, y la cantidad de grupos independientes que tienen acceso a un acelerador determinado. Esto quizá limite de forma considerable el número de nuevos experimentos que puedan efectuarse. Ya se ha formulado la propuesta de un acelerador «mundial», que sea compartido por físicos de todos los países. Es muy probable que la escasez de recursos —entre otros elementos— limite el tamaño de los aceleradores; el costo de los que se proyectan en la actualidad se eleva a varios miles de millones de dólares cada uno.

Por supuesto esta descripción sería muy distinta si el costo y la escala de los aceleradores y los detectores de partículas pudiesen reducirse drásticamente sin afectar su rendimiento. Hay posibilidades de conseguirlo; una de ellas consiste en el uso de intensos haces de láser para la aceleración de partículas. Si los costos de un acelerador se redujesen de manera drástica, cada

laboratorio de investigación podría tener su propio acelerador, de forma parecida a lo que ocurría con los ciclotrones hace treinta años. Si sucede tal cosa, la investigación en física de las partículas podría ser llevada a cabo por equipos pequeños.

Otro descubrimiento que quizá sirva para dividir los grandes grupos de físicos sería la detección de fenómenos fundamentales con independencia de la investigación acerca de la física de los aceleradores. Los físicos que estudian las partículas pueden apartar su atención de la física de la aceleración si se encuentran vestigios fósiles del Universo primitivo, que posean una masa demasiado grande para ser producida por un acelerador. Algunos aspectos del estudio de dichas partículas fósiles requerirían grandes grupos de investigación, pero otras facetas exigirán un nuevo enfoque experimental, que podría ser realizado con ventaja por grupos pequeños. Si el centro de atención de la física de partículas se desplaza en esta dirección, los grandes laboratorios de hoy quizá se conviertan en algo semejante a las grandes pirámides, que en determinado momento constituyeron el foco central de la atención, pero que en la actualidad no son más que una de las etapas a lo largo de una visita turística por las glorias del pasado.

Una sobreabundancia de científicos también conduce a una competencia con respecto a las ideas. Cuando había pocos científicos que trabajaban en un campo determinado, era posible que un individuo considerase que una parte de dicho campo era suya, y la explorase sin demasiada rivalidad con otros científicos. Esto no significa que a veces no hubiese varios científicos trabajando en el mismo problema al mismo tiempo. Tal competencia ha permitido varios descubrimientos importantes, por ejemplo, el descubrimiento del electrón en 1897. Sin embargo, antes del siglo XX —e incluso antes del período siguiente a la Segunda Guerra Mundial— se trataba de un fenómeno infrecuente.

En la actualidad, la cantidad de investigadores que existen en la mayoría de las áreas científicas es tan amplia que muy pronto hay muchos que se apoderan de cualquier idea prometedora. Esto ocurre con más facilidad en la ciencia teórica, donde no se plantea un problema grave de acceso a las instalaciones, pero también se da en la ciencia experimental, cuando se duplican instalaciones de investigación semejantes en distintos laboratorios del todo el mundo.

A menudo la competencia pone de manifiesto con rapidez la fuerza o la debilidad de las ideas nuevas, y ayuda a evitar que un científico se interne durante mucho tiempo en un callejón sin salida. Esta clase de competencia es muy provechosa para numerosos científicos contemporáneos. En su libro *La doble hélice*, James Watson expone cómo la estructura del ADN fue revelada gracias a un espíritu de animada y estimulante rivalidad. La competencia también confirma a los científicos que aquello que están llevando a cabo tiene valor dentro del planteamiento general de la ciencia, confirmación que no siempre estaba al alcance de los trabajadores en solitario del pasado.

Sin embargo, la mayor competencia también tiene una faceta negativa. A menudo hace que los científicos trabajen con una prisa exagerada, lo cual provoca errores. Además, si los científicos creen que disponen de menos tiempo para acabar su labor, darán a conocer resultados parciales y no un cuadro completo de los problemas, y quizá se pierdan aspectos importantes de los fenómenos que se estudian. Una señal de ello es la proliferación en diversos campos científicos de «revistas epistolares», en las que se publican con carácter periódico comunicaciones breves con gran rapidez. En ciertos campos donde la competencia es intensa, la práctica común consiste en enviar a tales revistas una serie de informes breves sobre el avance de una investigación, como forma de mantenerse en cabeza de dicha rivalidad. Se supone que el grupo acabará por enviar una descripción completa del trabajo a una revista, pero no siempre sucede tal cosa, y cuando ocurre, a menudo es demasiado tarde para influir sobre los avances en este terreno. En este contexto, la proliferación de tales revistas ha causado involuntariamente un descenso en la calidad de la investigación científica y en su ámbito de influjo.

A menudo quienes contemplan desde fuera la situación se quejan de que la competencia hace que los científicos teman revelar prematuramente sus resultados a los posibles competidores. Este mantenimiento del secreto no es un fenómeno nuevo. En el siglo XVII, los científicos como Galileo enviaban sus trabajos a sus colegas de manera cifrada, presumiblemente para evitar los robos (fig. 30), y algunas de las comunicaciones breves que hoy emplean los científicos tienen el mismo carácter críptico. Este secreto constituye la antítesis de la relación que en teoría se supone que los científicos mantienen entre sí, pero en la

A. HAEC IMMATURA A ME IAM FRUSTRA LEGUNTUROY
(Es aún pronto para que estas cosas puedan ser leídas por mí)

B. CYNTHIAE FIGURAS AEMULATUR MATER AMORUM
(Venus emula las formas de la Luna)

C. MACULA RUFA IN IOVE EST GYRATOR MATHEM, ETC.
(Hay en Júpiter una mancha roja que gira matemáticamente)

Fig. 30. Anagramas de Galileo. En *A* aparece un anagrama en latín que Galileo envió a Kepler, para «anunciar» el descubrimiento de las fases de Venus (abajo figura la traducción literal de la frase). En *B* se puede ver el mensaje reordenado, junto con su traducción correspondiente. En *C* se reproduce una solución «incorrecta» de dicho anagrama, hallada por Kepler, junto con su traducción. Curiosamente, en Júpiter existe una mancha roja giratoria, que se descubrió 250 años más tarde.

ciencia esto es menos frecuente de lo que se piensa desde fuera. Aunque un científico determinado quizá no esté dispuesto a exponer sus resultados provisionales a un competidor, la mayoría de los científicos hablan con franqueza de lo que están haciendo. Debido a esta franqueza, y a los activos nexos de comunicación que existen entre la mayoría de centros científicos de todo el mundo, rara vez ocurre que un científico interesado en un tema ignore lo que están haciendo los demás científicos en dicho terreno. El exceso de información constituye un problema más grave. Cada científico se ve inundado por tanta información que el asimilarla en su totalidad exige una inmensa inversión de tiempo y esfuerzo.

Una situación más peligrosa —cuando ocurre— es el fraude científico. En época reciente se han dado unos cuantos casos relevantes en los que ha habido una invención de datos por parte de científicos; un ejemplo de ello consistió en pintar parches en ratas de laboratorio para demostrar que un injerto de tejido había tenido éxito. Cabe la tentación de atribuir estas anomalías en la investigación a un aumento en la competición en torno a determinados recursos económicos o a una ambición de prestigio, pero la causa suele ser diferente. Con la máxima frecuencia el culpable hay que buscarlo en el autoengaño. Un científico adquiere una prematura convicción acerca de sus ideas, y decide

internarse por un atajo inaceptable para demostrar la corrección de aquello que cree. Estos autoengaños no son nuevos en el terreno de la ciencia, y no hay razones para pensar que esté aumentando su incidencia. De hecho, la mayor cantidad de científicos que trabajan en un problema a menudo lleva a un más rápido desenmascaramiento de estos fraudes.

En definitiva, sólo hay dos defensas contra el engaño en la ciencia. Una es que los miembros del *establishment* científico continúen recordando —y hagan recordar a sus discípulos— cuáles son las prácticas aceptables dentro de cada disciplina. En conjunto, este principio ha sido muy útil para evitar las prácticas fraudulentas. La otra defensa contra el engaño consiste en que todos los resultados científicos deben mantenerse en estado de duda hasta que hayan sido comprobados por varios científicos independientes, por elevada que sea la reputación de quienes los propongan. Este principio, que puede verse reforzado por un saludable espíritu competitivo, garantiza que casi todos los fraudes científicos queden de relieve con gran rapidez.

LOS RECURSOS ECONÓMICOS DE LA CIENCIA

El trabajo de los científicos ha cambiado de forma considerable debido al gran incremento en los fondos disponibles para la investigación científica. Este aumento de los recursos ha permitido que los científicos proyecten y lleven a cabo investigaciones que en caso contrario resultarían inimaginables. En la física experimental de las partículas, ciertos experimentos individuales han costado decenas de millones de dólares, más de lo que se gastaba en toda la ciencia hace cincuenta años. Se están construyendo aparatos de astronomía —por ejemplo, telescopios en órbitas espaciales— que cuestan centenares de millones de dólares. En química y en biología no son frecuentes los proyectos individuales de estas dimensiones, pero el nivel global de gastos por cada científico que trabaja en ese ámbito es semejante al que se da en física. A pesar de las quejas de los científicos acerca de la mezquindad del apoyo gubernamental a la investigación básica, tal apoyo ha permitido una transformación radical en la manera de hacer ciencia. Sin la ayuda económica oficial, no se habría descubierto mucho de lo que ahora conocemos sobre el mundo.

La generosidad oficial ha hecho que la carrera de los científicos y el ambiente de los laboratorios de investigación resulten más agradables de lo que habría sido en caso de no haberse producido. No obstante, aunque los fondos dedicados a la investigación científica son amplios en comparación con los criterios anteriores, siguen siendo limitados. Debido a una aplicación de la ley de Parkinson, las propuestas de proyectos científicos se expanden hasta superar los recursos disponibles. Además, como ocurre en una pequeña población que de pronto recibe un rico y nuevo suministro de alimentos, los científicos han respondido al incremento de recursos reproduciéndose a sí mismos con rapidez. Se ha calculado que el «tiempo de generación» de los científicos —es decir, el tiempo que un científico tarda en formar a otro nuevo en el mismo terreno— es inferior a diez años, y los científicos que trabajan en las universidades se «reproducen» muchas veces a través de los estudiantes que han formado. La cantidad de doctorados que se obtienen cada año es notablemente mayor que el número de científicos que fallecen o se jubilan; la población científica aún no ha alcanzado un crecimiento demográfico cero.

Los numerosos científicos que intervienen en la investigación básica, la mayoría de los cuales dependen de los fondos gubernamentales para su investigación, compiten intensamente con objeto de conseguir los limitados recursos disponibles. En los Estados Unidos estos recursos suelen concederse mediante un proceso denominado «revisión por los pares». Un científico que desee recibir apoyo oficial para sus investigaciones tiene que elevar una propuesta al organismo gubernamental correspondiente, por ejemplo la National Science Foundation. Esta propuesta es examinada por un grupo de científicos que trabajan en el mismo campo general, y se compara con las demás propuestas que aspiran a utilizar los mismos fondos. Finalmente, se concede la ayuda a determinadas propuestas, y se comunica cortésmente al resto de científicos que vuelvan a intentarlo el próximo año.

Como los recursos económicos son tan importantes, los científicos dedican mucho tiempo y esfuerzo a preparar sus propuestas. A menudo, como garantía contra el rechazo, un científico presenta propuestas semejantes a varios organismos que conceden subvenciones. Algunos científicos han calculado que dedican el 20 % de su jornada laboral a la preparación de pro-

puestas. El «suministro alimenticio» de fondos oficiales para la investigación científica se está convirtiendo en algo relativamente escaso, y en la actualidad los científicos tienen que disputar tales recursos a gran cantidad de colegas. Esto no se debe a una restricción en los fondos disponibles; al contrario, el enorme aumento en el número de científicos en ejercicio y el extenso ámbito de los proyectos científicos han planteado mayores exigencias con respecto a los fondos que se dedican a la investigación.

El patrón que adopte el futuro apoyo del gobierno será de gran importancia para el porvenir de la ciencia. Es evidente que no cabe esperar un futuro incremento del apoyo oficial a la ciencia en una proporción comparable al aumento ocurrido con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial. A pesar de todo, podrían darse aumentos significativos en los fondos que los gobiernos conceden a la investigación. Una reducción sustancial en los gastos militares, por ejemplo, permitiría que los gobiernos asignasen más fondos a la investigación científica, sobre todo en los países desarrollados. En estos países hay muchas personas con formación técnica que trabajan en problemas relacionados con lo militar, y su talento podría dirigirse hacia la investigación pura. Aun en el caso de que no se modifiquen las prioridades de gasto público de los gobiernos, un crecimiento continuado de la renta real de los habitantes del mundo permitirá un notable incremento en el apoyo oficial a la investigación pura.

Es probable que el nivel del apoyo oficial a la ciencia fluctúe en el futuro, y que por lo tanto tengan que aplazarse proyectos científicos valiosos, o no se les conceda ninguna ayuda. Sin embargo, resulta improbable que se reduzca demasiado el nivel de subvenciones oficiales en los países desarrollados. Los gobiernos han reconocido que la investigación científica es un elemento importante para el bienestar económico y tecnológico de cualquier país. Ya no es posible —como ocurría en el siglo XIX— que un inventor sin formación especializada y trabajando en un sótano asuma la función de hacer que avance la tecnología.

No me viene a la mente ningún proyecto científico cuyo retraso durante unos cuantos años comprometa seriamente el progreso de la ciencia en conjunto. Los observadores objetivos deben mostrarse escépticos con respecto a la inminente catástrofe que afectaría a aquellos científicos cuyos proyectos se retrasen por falta de fondos. Por otro lado, el hecho de negar recursos

durante varias décadas a toda un área de investigación provocaría un perjuicio duradero. La mayoría de los científicos que deseasen trabajar en ese campo se verían obligados a abandonarlo, y quizá no habría científicos suficientes para continuar la labor allí, aunque vuelvan a concederse fondos en ese sector. Los científicos estadounidenses que desean utilizar sondas espaciales para estudiar otros planetas se enfrentan hoy a esta amenaza. Una mezcla de costos elevados, plazos temporales prolongados e ineficaz justificación de las propuestas científicas ha provocado una virtual detención de los esfuerzos que realizan los Estados Unidos en este campo. Pronto pueden romperse los equipos de científicos —tanto dentro como fuera de la NASA— y la exploración planetaria mediante sondas espaciales quizá se retrase hasta el siglo XXI.

Sin embargo, existe un factor que ayudará a disminuir estas perspectivas poco halagüeñas. La diversidad política del mundo es tan grande que la mayoría de los proyectos científicos valiosos probablemente atraigan algún tipo de apoyo financiero. En la década de 1970, cuando los Estados Unidos restringieron su programa de ciencias espaciales, otros países afrontaron el desafío, dándose cuenta de que se les presentaba allí la oportunidad de desempeñar un papel destacado en la exploración espacial. Los países de Europa Occidental elaboraron un programa conjunto destinado a investigar la aparición del cometa Halley en 1985-86, misión que fue cancelada en los Estados Unidos. Este tipo de intercambio de papeles entre las empresas científicas de los distintos países es muy saludable para la ciencia.

Los científicos tienen que aprender a buscar alternativas cuando los fondos oficiales disminuyen o se vuelven inseguros. Los biólogos moleculares están aprovechando las inmensas aplicaciones tecnológicas de su labor para obtener fondos de fuentes no gubernamentales. Dichos recursos proceden en parte de las empresas que trabajan en el campo de la tecnología médica. En otros casos, ciertos grupos de científicos han constituido sus propias empresas que llevan a cabo la investigación y al mismo tiempo comercializan sus resultados tecnológicos.

Es posible realizar una investigación científica de primera clase dentro de una empresa lucrativa, como han demostrado los Bell Laboratories en los Estados Unidos y los Philips Laboratories en Holanda. Sin embargo, esto plantea asimismo problemas potenciales. Si la investigación biológica de vanguardia

es en gran parte subvencionada por fuentes privadas, el secreto puede desempeñar en la investigación biológica un papel mucho más considerable que el que ha entrañado jamás en la investigación física. El propósito de optimizar los beneficios empresariales puede entrar en conflicto con el propósito de los científicos de comunicarse entre sí. La historia de los Bell Laboratories muestra que esto no es necesariamente así. A pesar de todo, si la motivación de lucro provoca de hecho una reducción considerable en las comunicaciones, se plantearía una amenaza real al progreso de la biología. Ningún laboratorio de investigación —por amplio y distinguido que sea el personal que trabaje en él— puede mantener un nivel elevado de investigación si no se produce una fecundación recíproca con el mundo exterior.

LA COMUNICACIÓN EN LA CIENCIA

En la actualidad, la forma más corriente en que los científicos se comunican entre sí es a través de artículos en revistas científicas. Las revistas de prestigio examinan cada una de las comunicaciones que les llegan para comprobar su corrección científica, y rechazan los artículos que consideren carentes de valor. Las publicaciones se hallan disponibles con facilidad ante los científicos que estén interesados en ellas. El enorme crecimiento en el volumen de la investigación científica fiable ha hecho difícil —o incluso imposible— estar al día en todo lo que se publica, incluso dentro de una especialidad muy determinada.

Los campos en rápido cambio plantean un problema particular: los descubrimientos a menudo se publican demasiado tarde para ser de utilidad. Hace cincuenta años no importaba en exceso si se sabía un año después qué era lo que estaban haciendo los otros científicos, pero en el entorno actual —tan competitivo— un retraso temporal constituye una desventaja muy seria. Los científicos tienen que estar al corriente de los descubrimientos más recientes. Un retraso prolongado en la publicación aumenta asimismo la posibilidad de que una investigación la repita más de un científico que desconozca la labor de los demás en este campo, lo cual provoca un conflicto acerca de a quién le corresponde la prioridad.

En algunos ámbitos la respuesta que se ha dado a este problema ha consistido en la distribución de «preimpresiones», ejemplares de artículos distribuidos con anterioridad a su publicación. Algunos científicos distribuyen cientos o incluso miles de ejemplares de cada preimpresión. No es infrecuente que los científicos más relevantes de cada campo de investigación reciban diariamente varias preimpresiones. El sistema de la preimpresión soluciona el problema de enviar la información con rapidez, pero no necesariamente lo hace con equidad. Puede resultar difícil que los científicos que no formen parte de los centros más importantes de investigación tengan acceso a las preimpresiones que les interesen.

Otro método habitual que los científicos utilizan para intercambiar resultados es la conferencia científica. A menudo, las conferencias describen los avances antes que las publicaciones, porque este sistema permite formular conjeturas y describir resultados menos completos. Además, el pronunciar una conferencia le da al científico la posibilidad de recibir una rápida respuesta crítica acerca de su labor, lo que quizá le ayude a evitar el apuro de publicar conclusiones que acaban por ser erróneas. No obstante, estas conferencias —al igual que las preimpresiones— sólo acostumbran estar al alcance de los científicos que trabajan en los principales centros de investigación, puesto que las conferencias a menudo sirven para dar a conocer la labor de un científico a aquellos que —en opinión de éste— pueden sacarle provecho profesional.

Con frecuencia se reúnen grupos de científicos durante varios días, para oír exposiciones de expertos en un campo determinado y para compartir sus avances en un contexto informal. En el caso de que estas reuniones sean de dimensiones reducidas, suelen ser consideradas como uno de los mejores métodos para la comunicación científica. Sin embargo, el esfuerzo por abrir estos encuentros a todos los científicos —unido al aumento en el número de científicos en ejercicio en casi todos los campos— ha hecho difícil conservar la intimidad de las reuniones que era normal hasta hace poco. Un seminario bianual sobre física de alta energía, que comenzó a celebrarse hace treinta años en la Universidad de Rochester con la asistencia de 50 personas, se ha convertido ahora en un acontecimiento internacional de gran envergadura, en el que participan miles de expertos. Diversas instituciones e incluso diferentes países se disputan el derecho a organizarlo. Estas megarreuniones tienen sus propias ventajas, pero por desgracia resulta muy poco probable que

constituyan un medio realmente útil para la comunicación entre científicos.

Una respuesta ante tal situación ha consistido en subdividir las ciencias en especialidades de ámbito más estrecho. Los científicos interesados en un área más reducida celebran sus propias reuniones y publican sus propias revistas especializadas. Esto ayuda a resolver los problemas de la superpoblación científica, pero tiene la desventaja de crear paredes artificiales entre campos científicos que de hecho se hallan muy vinculados entre sí. Es preciso idear otras soluciones.

LA RED INFORMÁTICA UNIVERSAL

Una red informática universal será un nuevo y poderoso medio de comunicación entre los científicos. De forma ideal, cada científico dispondrá de un terminal de computador que le dará acceso al trabajo de gran número de otros científicos que trabajan en el mismo terreno. Para comunicar un hallazgo, el científico lo enviará a través de la red informática, desde la cual podría ser aprovechado por quien esté interesado. Esto solucionará los problemas de quienes no estén en la lista de receptores de preimpresiones o en la lista de invitados a seminarios. Sería fácil efectuar un índice y un resumen de cada aportación, de manera que los miembros de la red se hallen en condiciones de decidir cuáles son los materiales que les interesan realmente. La red será interactiva, de modo que los científicos podrán «conversar» acerca de las aportaciones de los demás a través del computador, lo cual les proporcionará el tipo de retroalimentación que tiene lugar en un congreso o un seminario. Una red informática eficaz aumentará la cantidad de personas al corriente de los últimos avances en cada ámbito, y crecerá de forma considerable el talento intelectual disponible para afrontar los problemas más relevantes.

Instalar y mantener una red de esta clase será caro, sin duda, pero los gérmenes de tales redes ya se pueden contemplar en algunas áreas científicas, por ejemplo, la física de partículas y la secuenciación de ácidos nucleicos. En la década de 1970 funcionó satisfactoriamente durante varios años una red de este tipo entre los diseñadores de microchips de computador. En el año 2000 habrá muchos tipos de redes informáticas de uso generalizado. El costo actual de distribuir la información científica entre los científicos ya es muy elevado. En mi departamento de la Universidad Columbia, el costo anual de impresión y distribución del trabajo de cada científico se eleva a unos 1.000 dólares. Para todos los físicos del mundo la cifra no es inferior a los 50 millones de dólares anuales. El intercambio de información científica a través de una red informática mundial no costaría mucho más, sobre todo si la red ya ha sido creada para otros usos.

Sin embargo, un sistema de esta clase tendría sus inconvenientes. Podría reforzar ciertos caprichos que ya se dan en algunas áreas de la ciencia. A veces, una gran cantidad de científicos seguirá durante un tiempo una determinada línea de investigación, para luego desertar de ella en favor de alguna otra novedad. Por ejemplo, hace algunos años un científico informó acerca del hallazgo de una nueva forma de agua, denominada «poliagua». Muchos otros científicos comenzaron a estudiar la poliagua, pero después de un tiempo dicha poliagua resultó ser nada más que una forma contaminada del agua ordinaria, y la investigación al respecto se abandonó en seguida. En algunos casos este tipo de emigración intelectual conduce a un avance de importancia. En otros, se trata más bien de seguir la última moda intelectual. Las preimpresiones han contribuido en gran medida a estas modas, ya que permiten una rápida distribución de información acerca de las labores científicas que se están llevando a cabo en cada momento, lo cual puede influir de manera desordenada sobre los científicos impresionables. Una red informática incrementaría aún más este proceso.

Los científicos necesitan una gran confianza en sí mismos para no tomar en consideración la línea investigadora aprobada por sus colegas o por los líderes intelectuales de sus campos respectivos, y dedicarse a trabajar sobre sus propias ideas. Tales científicos se arriesgan a que su labor sea ignorada por la mayoría. En el momento actual, los científicos al menos pueden publicar su trabajo y aspirar a que se dé un cambio en la moda. Si todas las comunicaciones tuviesen lugar a través de la red informática, hasta esta esperanza llegaría a desaparecer —debido a una retroalimentación más rápida, o a la carencia de ésta— y las presiones para ajustarse a los temas de investigación más generalizada se incrementarían.

Otro problema que resultaría agravado por una red informática universal consiste en la creciente demanda con respecto al

tiempo de cada científico individual. La facilidad de las conversaciones a través de la red reduciría de hecho el tiempo dedicado a la investigación. Sería como si cada científico estuviese asistiendo a un congreso permanente con sus colegas de todo el mundo. Tendría que apelar a una gran autodisciplina para limitar el uso de la red a sus propios objetivos de investigación.

A pesar de estos posibles defectos de funcionamiento, espero que las redes informáticas se conviertan en el medio de comunicación predominante en el siglo XXI.

EL LUGAR DE LA CIENCIA EN EL MUNDO

A lo largo de los años ha cambiado de forma significativa el papel desempeñado por la ciencia en la vida intelectual de la sociedad en su conjunto. Al comienzo de la ciencia moderna, en el siglo XVII, era frecuente que los científicos —Newton, por ejemplo— considerasen que la ciencia estaba subordinada a otras actividades intelectuales, por ejemplo, la religión. Ahora los científicos piensan que la investigación científica domina la aventura intelectual del ser humano. Este cambio de opinión es en gran medida una consecuencia del éxito sin precedentes que los científicos han tenido en la solución de los problemas que se plantean. El contraste entre la ciencia —donde las respuestas a las preguntas a menudo se encuentran con mucha rapidez— y los campos como el de la filosofía —donde casi nunca se hallan respuestas definitivas— ha influido poderosamente en que los científicos se convenzan de la preeminencia intelectual de su labor.

Esta supremacía apenas resulta puesta en tela de juicio por los no científicos. Cuando en el mundo sucede algo nuevo o inesperado —por ejemplo, una ola de frío en verano o una nueva enfermedad—, la inmediata reacción de muchos consiste en preguntarse qué es lo que la ciencia tiene que decir al respecto. En realidad, esta actitud no se basa en una comprensión acerca de qué es una explicación científica, o cómo tratan los científicos de comprender los nuevos fenómenos. En cambio, procede de una aureola general de prestigio que se basa de manera vaga en los pasados logros de la ciencia.

No obstante, existen excepciones con respecto a la hegemonía intelectual de la ciencia, sobre todo en el terreno ético y religioso. Muchos científicos creen que a la ciencia le resulta imposible dar una respuesta a interrogantes de carácter ético, por ejemplo, acerca de si el aborto voluntario es moralmente justificable. A lo único a que puede aspirar la ciencia es a colaborar en la clarificación de las cuestiones de hecho relacionadas con estos interrogantes, por ejemplo, estudiar si un feto puede experimentar dolor. Muchos no científicos y algunos científicos consideran que constituye un defecto de la ciencia el que los temas éticos se encuentren más allá de su alcance; después de todo, las cuestiones éticas son por lo menos tan importantes para la vida de las personas como las cuestiones prácticas. Este tipo de crítica se remonta al menos hasta Sócrates. No obstante, muchos filósofos defienden —opinión que yo comparto— que los interrogantes éticos no tienen respuesta en el mismo sentido que los interrogantes científicos; los científicos dan pruebas de buen sentido cuando no utilizan la ciencia para tratar de contestar dichas preguntas.

La relación entre ciencia y religión es más compleja, y la frontera entre ambas no se ha trazado aún de una forma que satisfaga a todos. Muchos de los temas que en otro tiempo fueron materia de fe religiosa han sido transferidos al ámbito de la ciencia. Este cambio no se ha producido sin un arduo debate, por ejemplo, acerca de la evolución de las especies, la biología molecular y —en ciertos lugares— acerca de todo el panorama de la ciencia.

Después de una larga historia de conflictos, ha quedado establecido que la religión no tiene nada que enseñar a la ciencia sobre la cuestión que más preocupa a ésta: la forma en que funciona el Universo. De acuerdo con esto, lo mejor sería que los creyentes religiosos abandonasen sus esfuerzos por influir en el contenido de la ciencia. La tendencia a largo plazo avanza sin duda en esta dirección, y a pesar de la agitación legalista que causan los que se denominan a sí mismos científicos de la creación, en el futuro los desafíos más serios que se plantearán a la ciencia no provendrán de los creyentes religiosos.

Es más frecuente que los creyentes religiosos dialoguen con los científicos acerca de los aspectos morales de la ciencia, sobre todo cuando las aplicaciones tecnológicas de ésta poseen un alcance tan notable como el de ciertas formas de biotecnología, que podrían cambiar literalmente la especie humana. Todos deberían aportar las fuentes de inspiración moral que tengan rela-

ción con cuestiones de tanta trascendencia. Sin embargo, también aquí la religión —ante los no creyentes— no puede aspirar a una atención mayor que la que reciban las demás fuentes de inspiración.

Si la religión no tiene nada útil que decir a la ciencia, ¿se deduce de ello que la ciencia no tiene nada útil que decir a la religión? Gran parte de las creencias religiosas han ofrecido explicaciones —por ejemplo, las que aparecen en el libro del Génesis— acerca de aspectos del Universo que ahora son explicados por la ciencia. En la medida en que esta motivación continúa desempeñando un papel importante en la creencia religiosa, los resultados a que llegue la ciencia son pertinentes, y cuando son comprendidos por los creyentes, pueden conducir a una modificación de la creencia o a su abandono. Los científicos de los países no marxistas casi nunca tratan de explicar sistemáticamente las consecuencias que tiene su labor con respecto a la fe religiosa, y no creo que esto cambie.

LA «IMAGEN» DEL CIENTÍFICO

En conjunto, los no científicos que viven en países desarrollados han manifestado actitudes positivas hacia los científicos, por lo menos en los últimos cincuenta años. Las encuestas de opinión entre los ciudadanos adultos en los Estados Unidos tienden a otorgar una calificación muy alta a los científicos como elementos útiles para la sociedad. Este respaldo procede en su mayor parte de las aplicaciones tecnológicas de la investigación científica, y no de una comprensión efectiva acerca de lo que hacen los científicos. De hecho, es muy probable que el público en general sienta una escasa simpatía por lo que motiva a los científicos en su trabajo. En la medida en que se dé un aprecio continuado hacia las consecuencias tecnológicas de dicha labor, la situación no es grave. Sin embargo, el aprecio continuado no se halla en absoluto garantizado, en particular porque muchos han denunciado ciertos avances tecnológicos: los reactores nucleares, los medios de prolongar la vida o los computadores, por ejemplo.

Aun en el caso de que podamos confiar en la aceptación pública de la ciencia gracias a sus subproductos tecnológicos, hay que afrontar otro problema. Para que la ciencia continúe existiendo activamente en el futuro, los científicos actuales tendrán que ser sustituidos por otros nuevos. Aunque en el momento actual estamos formando futuros científicos en cantidad más que suficiente, quizás esto no siempre sea así. Los jóvenes deciden dedicarse a una carrera científica por numerosas y complejas razones. Entre éstas se halla sin duda el hecho de entrar en contacto a muy temprana edad con los éxitos de la ciencia, presentados de un modo que los convierte en algo deseable, y en lo cual se puede participar.

En cierto grado, los jóvenes entran en contacto con la ciencia a través de la escuela y de los libros. Sin embargo, a la mayoría de los niños —por lo menos en Estados Unidos— se les ha presentado una imagen alternativa de los científicos y con unos rasgos muy negativos. En los tebeos, en las películas y en la televisión, el retrato predominante de los científicos es sumamente antipático para los niños. Por ejemplo, la descripción de los científicos que se ofrece en los dibujos animados de la televisión no tiene el menor parecido con la vida real de los científicos, y las diferencias con la realidad siempre sirven para empeorar las motivaciones de éstos. El «científico loco» de los dibujos animados de televisión —que trata de dominar o de destruir el Universo— es sólo una de las manifestaciones que tiene la negativa imagen de la ciencia que aparece en los medios de comunicación social. La serie de televisión *Star Trek* (La conquista del espacio) goza de una amplia audiencia, sobre todo entre los jóvenes. Describe los «viajes de la nave estelar *Enterprise*, su misión de cinco años de duración en la que explora nuevos y extraños mundos, para buscar nueva vida y nuevas civilizaciones, para ir osadamente adonde ningún hombre ha ido con anterioridad». Esto parece una empresa científica de primer orden, y sus seguidores quizá consideren que la trama de la serie es lo que los científicos hacen y piensan. Sin embargo, casi todos los guiones de dicha serie implican violentos conflictos, que a menudo se plantean entre la tripulación de la *Enterprise* y diversos «científicos» con motivaciones nada científicas. El único personaje de carácter vagamente científico que allí aparece —y de una manera nada simpática— es el señor Spock, que sólo es humano en parte.

Incluso cuando las motivaciones de los científicos no se exponen de manera errónea, en las ficciones que se publican en los medios de comunicación social su vida y su trabajo se suelen

describir en unos términos tan negativos como para que la ciencia dé la sensación de ser una carrera muy indeseable. No es sorprendente que las encuestas de opinión muestren que la mayoría de los jóvenes acaben por sacar esta conclusión acerca de la ciencia.

Conviene plantearse por qué los proveedores de cultura popular realizan un esfuerzo tan agotador para dibujar a la ciencia y a los científicos con los tonos tan espeluznantes que son habituales en el género. No está claro si la imagen negativa de la ciencia ha sido trazada voluntariamente con objeto de rebajarla, o si esto no es más que una convención propia de los medios de comunicación. Este patrón se halla probablemente relacionado con el generalizado desconocimiento que se comprueba en nuestra sociedad acerca de lo que los científicos tratan de hacer. La mayoría de ellos se dedica a comprender el mundo, actividad que debería resultar benéfica incluso para los creadores de dibujos animados televisivos, pero muchas personas no familiarizadas con la ciencia suponen que los científicos están básicamente preocupados por controlar el mundo. Cuesta poco llegar a la conclusión de que la motivación de los científicos consiste en dominar el Universo, aspiración primordial que les atribuye la cultura popular.

Es improbable que esta imagen de los científicos cambie en un plazo breve, como consecuencia de una mayor comprensión acerca de lo que se propone la ciencia. Ha habido cierto incremento en la alfabetización científica de la población en general, como lo atestigua el éxito de diversos intentos de «hacer» ciencia en los medios de comunicación social, por ejemplo la serie «Cosmos» de la televisión y la revista *Discover*, de gran tirada. No obstante, tales intentos se han dirigido mayoritariamente a adultos y no a los niños, que son las víctimas de los erróneos retratos de los científicos que aparecen en los medios de comunicación. Los científicos no toman en serio este problema de la equivocada imagen de la ciencia, pero dicha complicidad es un error. Siempre que ante unas mentes impresionables se presente sistemáticamente una imagen falsa de un grupo determinado de personas, a largo plazo aparecerán consecuencias perjudiciales para el grupo en cuestión. Si esto no ha ocurrido todavía con los científicos, se debe a que existen presiones favorables que proceden de otras direcciones, pero no podemos confiar en que siempre prevalezcan estos factores compensatorios. Si los

científicos no prestan atención a lo que los demás están diciendo falsamente acerca de nosotros, quizá descubramos muy pronto que las consecuencias de ello son muy desagradables.

LAS AMENAZAS INTERNAS A LA CIENCIA

El hecho de que la ciencia sobreviva depende al mismo tiempo de factores internos y externos a ella. En mi opinión, los factores internos son los decisivos. En el pasado la ciencia ha florecido sin un apoyo externo significativo, y si es necesario pasará lo mismo otra vez, aunque sea a una escala muy reducida. Sin embargo, no puede florecer si faltan determinadas actitudes dentro de los científicos mismos.

A la forma que la ciencia ha adoptado a partir del siglo XVII han contribuido diversos impulsos humanos. Uno de ellos es el deseo de comprender el mundo mediante el uso de nuestro intelecto. Este impulso no se encuentra sólo en la ciencia, sino también en otras actividades humanas, por ejemplo, la filosofía especulativa y algunas formas de teología. Un segundo impulso —más específico que la ciencia— es el no estar dispuestos a aceptar unos resultados que se basen exclusivamente en la autoridad. Cualquier noción científica está abierta a la investigación por parte de cualquier cultivador de la ciencia. El hecho de que una idea en particular haya sido descubierta por un científico reverenciado en el pasado no la convierte en verdadera. A este respecto, la ciencia se distingue de la teología y de otros sistemas intelectuales, donde la autoridad del fundador a menudo se considera como razón suficiente de la validez de una proposición. El carácter experimental de gran parte de la ciencia constituye la expresión más pura de este aspecto de la actitud científica.

Paradójicamente, el tercer impulso que ha intervenido en la configuración de la ciencia es la voluntad de los científicos de cada generación de edificar sobre la base formada por el trabajo de los científicos anteriores. Este carácter acumulativo de la ciencia la distingue de la filosofía especulativa, donde cada filósofo que examina un problema tiende a considerar el trabajo de sus predecesores como una maleza que hay que eliminar del camino, y no como una sólida base para sus propias investigaciones. El hecho de que la ciencia sea acumulativa es una de las

facetas del espíritu de colaboración característico de la investigación científica. Otra faceta consiste en que la labor de cada científico depende de la de los demás científicos contemporáneos, a través de las aportaciones que éstos hagan a la labor de cada uno en particular, y de la aceptación última que le otorgue la comunidad científica.

Algunos —por ejemplo Gunther Stent— sostienen que se está desvaneciendo el impulso de curiosidad que ha motivado gran parte de la investigación científica, junto con otros impulsos humanos hacia el logro creativo. A causa de ello, se aduce, en el mundo del futuro la comprensión científica será una cuestión que no preocupará a nadie. El físico norteamericano Leon Lederman ha llegado a sugerir incluso que las sociedades futuras descubrirán nuevos placeres tan intensos que ninguna de las actividades que valoramos en la actualidad estará en condiciones de competir con ellos para atraer nuestra atención. Esta sugerencia se basa en el descubrimiento de que —en determinadas condiciones— las ratas prefieren una estimulación eléctrica de los centros del placer que hay en su cerebro, en comparación con los tradicionales orígenes de la gratificación en las ratas, tales como el sexo y la comida. Encuentro ridícula la idea de que la función definitiva de la mente humana sobre la Tierra consista en diseñar un medio para autoanularse.

Además, una sociedad formada por buscadores de placer se hallaría en clara desventaja para competir con otras sociedades cuyos miembros posean motivaciones distintas, cosa de la cual se dieron cuenta muy tarde los habitantes de la antigua Sybaris. En conjunto, creo que la disminución de la curiosidad humana es la menor de las amenazas que se plantean para la continuidad futura de la ciencia.

Por supuesto, puede cambiar aquello que se considere como objeto adecuado de curiosidad. Tanto en la Grecia antigua como en la antigua China ocurrió que el principal centro de interés de los intelectuales pasó desde el Universo exterior hasta el estudio de las cuestiones humanas y las palabras creadas por la mente del hombre. Algunos han insistido en que un cambio semejante en los intereses beneficiaría a nuestra propia sociedad. No obstante, me sorprendería que sucediese tal cosa, a menos que se dé un avance enorme en el contenido intelectual del pensamiento político y social. Uno de los atractivos de la ciencia moderna es su obvia posibilidad de progreso incontrovertible, algo muy distinto al dudoso avance que se produce en otras esferas del pensamiento. Sócrates logró que la filosofía griega pasase desde la ciencia empírica a la moral porque ni una ni otra habían avanzado demasiado en su tiempo. Será necesario algo más que meras palabras para que suceda lo mismo con respecto a los logros intelectuales de la ciencia moderna.

También me siento optimista acerca de que los científicos del futuro resistirán a la tentación de sustituir por la autoridad la observación y la experimentación como origen último de la sabiduría científica. En la sociedad en general se aprecian tendencias a favor y en contra de la sumisión ante la autoridad, y esta diversidad probablemente garantice que muchos científicos continuarán siguiendo su propio sendero hacia la verdad.

En cambio, no estoy tan convencido de que la ciencia logre conservar su sentido de comunidad, tanto con la ciencia del pasado como entre los colegas de actividad. Uno de los factores que distorsionan esta sensación de comunidad es el incremento en la competición con respecto a los recursos necesarios para llevar a cabo la investigación científica. Cuando todos los científicos eran relativamente indigentes, tal rivalidad quedaba subordinada a un sentido de objetivo compartido. El maná suministrado por el apoyo oficial, el rápido crecimiento que esto ha hecho posible y la subsiguiente absorción de los fondos disponibles ha convertido a tal competición en un factor mucho más importante para la ciencia de lo que era en épocas anteriores.

Tal competencia no es algo malo del todo; muchos científicos (como las personas pertenecientes a otros ámbitos) trabajan mejor bajo la presión que así se provoca. Sin embargo, no debemos imaginarnos que el sentido de objetivo compartido —que desempeñó un papel tan relevante en la forma de hacer ciencia en el pasado— sobrevivirá automáticamente a la transición hacia un entorno social en el cual los colegas serán considerados como rivales en la búsqueda de recursos esenciales. El sentido de comunidad con los científicos del pasado involucra otros temas, que expondré en el capítulo final.

LAS AMENAZAS EXTERNAS A LA CIENCIA

Las amenazas que se le plantean a la ciencia desde fuera son menos graves que las internas que acabamos de examinar, si

bien parecen más relevantes ante un observador no sistemático. Nos encontramos con la amenaza de un control social sobre el tipo de investigación que se lleve a cabo, y sobre las conclusiones de dicha investigación. También está la amenaza de un recorte considerable en el nivel de soporte económico. Ambas amenazas se han hecho realidad en ciertos casos recientes, y tal experiencia ha provocado en muchos científicos un estado de alerta ante su eventual reiteración.

Creo que la única amenaza grave que la sociedad plantea a la continuidad de la ciencia procede del deseo de ejercer controles sociales sobre ella. Este deseo se descubre en diversos lugares de la sociedad. Existe entre algunos de aquellos que se sienten amenazados por los descubrimientos de la ciencia, por ejemplo, los creyentes en religiones fundamentalistas. Existe entre aquellos cuyo apasionamiento por la justicia social les ciega ante la posibilidad de que haya otros impulsos humanos cuya gratificación resulta igualmente deseable. Existe entre aquellos que no creen que ciertos esfuerzos se justifican por sí mismos, y no como medios para otros fines de carácter social. Y con la máxima gravedad, existe entre aquellos que temen las posibles consecuencias de tratar de aplicar el conocimiento científico a una modificación de la condición humana. Todas estas razones para limitar las actividades de los científicos son muy distintas entre sí, y varía de modo significativo el grado en que se justifican. Sin embargo, con objeto de predecir las futuras restricciones que se impongan a la ciencia, lo que importa más es la fuerza del impulso y cómo se manifiesta.

Creo que no existe ninguna razón válida para que una sociedad limite el tipo de interrogantes que los científicos puedan investigar, o para colocar vallas al tipo de respuestas que los científicos encuentren a las preguntas que les interesan. La sociedad sólo debe restringir la investigación científica que perjudique directamente a otros seres humanos. No se justifica que una sociedad regule la curiosidad de sus científicos más de lo que regula sus hábitos alimentarios o la expresión de sus artistas.

A la ciencia de hoy le plantean un grave problema las acciones de aquellas personas que —tanto dentro como fuera de la ciencia— desean prohibir la investigación en ciertas áreas controvertidas. Los científicos que trabajan en el ámbito de la herencia de la inteligencia o en el ADN recombinante a veces han tenido que enfrentarse con una violenta oposición. Como consecuencia, muchos científicos interesados en estos temas han decidido evitar por completo estos campos de investigación. Una eminente investigadora sobre la heredabilidad de la inteligencia ha dicho que, si su labor demostraba que la inteligencia era en gran parte una cuestión hereditaria, experimentaría la tentación de marcharse de los Estados Unidos, debido a la controversia que engendraría este hallazgo.

Esta clase de coacción nunca ayuda a los propósitos de la ciencia. Pueden existir razones válidas para tratar de convencer a los científicos de lo inapropiado de ciertas líneas de investigación, y una aguda crítica intelectual es perfectamente admisible dentro de las relaciones normales entre los científicos. No obstante, un acoso violento de los colegas cuya investigación se desaprueba es algo que está fuera de lugar. En cuanto grupo, los científicos han de dar los pasos necesarios para desalentar tal coacción cuando surja en el seno de la ciencia. Aquellos científicos que de forma periódica la practican tienen que ser considerados con el mismo desprecio que los científicos que falsean investigaciones. Sean cuales fueren el resto de sus méritos, sus colegas tendrían que penalizarlos profesionalmente. Si permitimos que alguien —por el motivo que sea— reprima mediante la fuerza la curiosidad científica, se habrá perdido entonces una de las grandes lecciones que la ciencia ha enseñado a la humanidad: a menos que todos seamos libres para expresar nuestra curiosidad en la búsqueda de la verdad, nos lleve esto adonde nos lleve, ninguno de nosotros será auténticamente libre.

Hay un área por la que creo que la sociedad sí tiene una legítima preocupación: las consecuencias tecnológicas de la investigación científica. Sin embargo, esta preocupación no justifica el que se vete determinado tipo de investigación. No podemos saber con exactitud cuál será la nueva tecnología que surja de la investigación científica hasta que tal investigación se haya llevado a cabo, y a menudo es necesario esperar bastante tiempo. Por eso, es probable que resulte ineficaz el tratar de controlar la tecnología mediante un control de la ciencia, a menos que restrinjamos toda investigación. Es mucho más eficaz controlar la tecnología en sí misma, una vez que ha sido demostrada su posibilidad, pero antes de que se haya desarrollado o puesto en práctica a gran escala.

Una cuestión diferente es si la sociedad tiene que influir sobre la dirección de la investigación científica, ajustándose a cri-

terios externos a la ciencia en sí misma, otorgando recursos económicos con carácter preferente a determinados ámbitos de investigación. En este modelo, los científicos serían libres para investigar las áreas que deseen, pero sería más probable que reciban ayuda económica si trabajan en temas a los que la sociedad concede un valor elevado. En cierta medida, este modelo funciona de hecho —al menos en los Estados Unidos— con el nombre de investigación dirigida, con el propósito de lograr unas metas tecnológicas específicas. Sin embargo, la mayor parte de la investigación científica no se halla dirigida en la actualidad, y los científicos que deseen adoptar sus propios intereses habitualmente consiguen recursos para sus investigaciones, si convencen a sus pares de que lo que hacen vale la pena de acuerdo con criterios científicos, y no según criterios impuestos desde fuera.

Tal situación —que considero como muy deseable para el progreso de la ciencia— quizá no dure demasiado. Al enfrentarnos con la situación actual —en la que una cantidad creciente de científicos compite para conseguir unos fondos que no crecen con la misma rapidez— es difícil que una sociedad resista la tentación de apoyar aquellos proyectos considerados como más beneficiosos a corto plazo para la mayoría de miembros de la sociedad.

Sería muy imprudente que la sociedad intentase dirigir la mayor parte de la investigación hacia objetivos tecnológicos específicos, porque no podemos predecir con exactitud y con gran antelación cuál será el enfoque de los problemas científicos no resueltos que nos conducirá a los resultados tecnológicos deseados. Este punto de vista queda demostrado mediante una comparación entre el proyecto Apolo —que no exigía nuevos descubrimientos científicos, y que se llevó a cabo aproximadamente en el tiempo calculado— y la «guerra al cáncer», que exige nuevos descubrimientos y que todavía no ha conseguido el éxito. En la actualidad, ni siquiera se sabe con claridad cuál sería el mejor enfoque para encontrar la curación del cáncer. Por desgracia, los científicos mismos a menudo prometen que de su investigación básica surgirán tecnologías específicas, quizá como manera de estimular la recepción de ayudas económicas. Tales promesas, a menos que se consideren como generalizaciones acerca de las consecuencias últimas de la investigación —o se refieran a situaciones muy específicas que habría que calificar

con más precisión como «desarrollo» y no como «investigación»—, muestran cortedad de miras. A largo plazo no sirven al propósito de aumentar el respaldo que se conceda a la ciencia, ya que tales predicciones a menudo están equivocadas, y cuando ocurre tal cosa, queda socavada la creencia de la gente en los logros de la ciencia, y en la veracidad de los científicos.

Cuando se necesitan nuevos descubrimientos científicos para lograr determinada tecnología en particular, el mejor método para efectuar tales descubrimientos es la investigación corriente no dirigida. A veces dichos descubrimientos aparecen en áreas claramente relacionadas con la tecnología deseada, y a veces, en áreas aparentemente no relacionadas con ella. Quizás esta actitud dé la sensación de estar al servicio de los científicos que desean seguir sus propios intereses. Sin embargo, es lo mejor que podemos hacer, y se trata del enfoque que —en mi opinión— resultará más fecundo en último término.

10. EL FUTURO DE LA CIENCIA

En la historia de la ciencia han aparecido muchos cambios de envergadura, en el ámbito de las ciencias individuales y en el carácter global de la ciencia. Es lógico esperar que se produzcan cambios ulteriores. Algunos de éstos serán la continuación de tendencias pasadas. Sin embargo, habrá otros avances más radicales, entre los que se contarán las modificaciones en la noción misma de lo que la ciencia está en condiciones de explicar.

Los avances que he descrito en el terreno de la física y la biología determinarán en parte el alcance global de dichas ciencias. En el caso de la física, habrá una continuidad de la tendencia que ha incrementado la gama de fenómenos que estudian los físicos. Después de que éstos descubriesen las leyes que rigen los fenómenos habituales y las formas habituales de materia, su atención se desplazó a lo inhabitual: a las partículas subatómicas de vida fugaz, a las etapas primitivas del Universo y a las distancias que están más allá del alcance de nuestros telescopios más potentes. Milagrosamente, han descubierto que muchos de estos fenómenos inhabituales se rigen mediante leyes que son consecuencia de otras que ya conocíamos.

En el futuro se constatará una aceleración en este patrón de la física, y continuará centrando su atención en los fenómenos que se hallan fuera de la experiencia ordinaria. A corto plazo, esto tendrá un desarrollo meramente cuantitativo, sin demasiadas modificaciones en las nociones básicas de la física. Sin embargo, a medida que avancemos más allá de lo habitual será preciso que modifiquemos las nociones básicas en aspectos fundamentales, actualmente inimaginables.

La tarea principal de la biología del porvenir consistirá en encontrar respuestas a muchas de las preguntas abiertas sobre los seres vivientes. Espero que esto se lleve a cabo primordialmente a través de la ampliación sistemática de los modelos moleculares, el uso de nuevas herramientas experimentales y —sobre todo— la aparición de las adecuadas descripciones simbólicas (es decir, matemáticas) de los fenómenos biológicos. La biología se volverá más parecida a las ciencias físicas, razonando desde los principios generales hasta los casos más específicos. El empleo de sofisticados métodos de proceso de datos también desempeñará un papel mayor en la biología del futuro, y algunas de sus perspectivas más importantes surgirán de la nueva información que nos proporcionarán estos datos adicionales.

También es posible que la biología del futuro verse sobre una gama más extensa de fenómenos cuando descubramos formas de vida extraterrestre, si es que se descubren. También es posible, sin embargo, que se descubran nuevas formas de vida en la Tierra, o incluso que se creen en nuestros laboratorios. Algunos de estos avances tendrán efectos positivos sobre la teoría biológica, ya que nos ofrecerán nuevas comprobaciones de sus nociones fundamentales, y nuevos enfoques acerca de los que ya se conoce.

Por último, el activo sector de la biotecnología tendrá grandes consecuencias para la biología del futuro. La creación de productos útiles servirá como criterio nuevo e importante que demostrará en qué grado los biólogos comprenden correctamente los fenómenos que estudian. Esta búsqueda de aplicaciones concretas obligará a los biólogos a estar mucho más atentos a los detalles de sus explicaciones, al igual que ha ocurrido con la tecnología física en el caso de la física. También es probable que ciertas formas de biotecnología nos proporcionen nuevas herramientas experimentales que los biólogos puedan emplear en sus estudios.

LOS CAMBIOS EN LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA

Si fuera posible resucitar a algunos de los ilustres científicos del pasado y describirles el estado actual de la ciencia, quedarían impresionados por los descubrimientos experimentales que se han realizado desde la época en que habían vivido, y por los nuevos medios de observación con que ahora contamos. Creo que no se mostrarían tan satisfechos acerca de los progresos en la ciencia teórica, debido sobre todo a los profundos cambios que se han dado en el tipo de explicación que los científicos están dispuestos a aceptar con respecto a los fenómenos que estudian. Incluso muchos científicos contemporáneos encuentran que algunos de estos cambios son inquietantes. Sin embargo, es importante reconocer que no son nuevos los cambios de forma en la explicación científica, y la correspondiente insatisfacción que producen en algunos científicos.

Desde la época de Newton hasta finales del siglo XIX, el modelo mecanicista —según el cual en el espacio se mueven pequeños cuerpos bajo el influjo de fuerzas recíprocas— fue considerado en física como la forma ideal de explicación. A finales del siglo XIX, James Clerk Maxwell utilizó modelos mecanicistas para que le ayudasen a descubrir las ecuaciones que describen los fenómenos electromagnéticos (fig. 31). Otros científicos de esa época, por ejemplo lord Kelvin, consideraron que los modelos resultaban más convincentes que las ecuaciones que Maxwell extraía de ellos.

Paradójicamente, los sucesores de Maxwell descubrieron que era mejor conservar las ecuaciones y abandonar los modelos mecánicos. Algunos de estos físicos sustituyeron los modelos mecánicos por una descripción en la que todos los fenómenos se explicaban apelando a campos electromagnéticos. Este esfuerzo —que nunca logró un triunfo completo— recibió, a principios del siglo XX, el nombre de imagen electromagnética del mundo.

En la década de 1920 se produjo una variación aún más radical a través del desarrollo de la mecánica cuántica. En este caso se puso en discusión el supuesto según el cual los fenómenos físicos tienen lugar con independencia de la forma en que se observan. Esta suposición básica para toda la investigación física anterior fue sustituida por una descripción en la cual aquello que se ve suceder depende decisivamente de los medios que emplean para contemplarlo. Además, con la aparición de la mecánica cuántica se desvaneció de un modo general la creencia en la posibilidad de una predicción *exacta* del futuro.

Si se tienen en cuenta estos cambios tan radicales en lo que puede hacer una teoría física y en la objetividad de nuestra des-

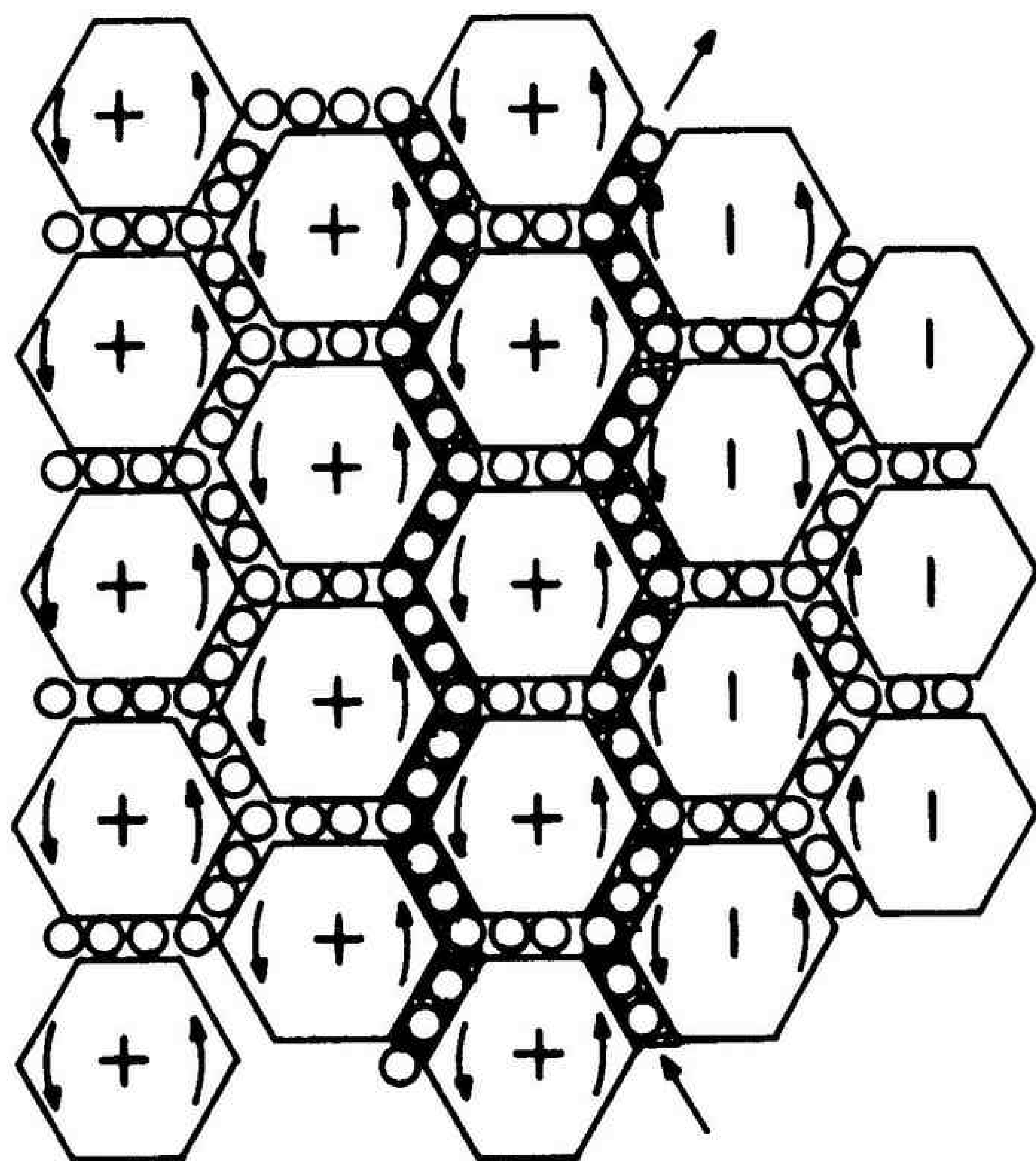


Fig. 31. Modelo electromagnético de Maxwell. Los hexágonos representan remolinos, y los pequeños círculos que los rodean son las partículas cargadas de electricidad. Se supone que las partículas y los remolinos giran concéntricamente y producen así el fenómeno que llamamos electromagnetismo.

cripción, no nos ha de sorprender que se haya producido una fuerte resistencia entre los físicos con respecto a la teoría cuántica. Einstein —que había efectuado importantes contribuciones al desarrollo inicial de la teoría cuántica— fue el líder de la leal oposición que se le planteó, y algunos científicos continúan hoy en la misma postura. Sus objeciones no se limitan a la afirmación general según la cual cualquier teoría científica puede ser reemplazada algún día. Por el contrario, sostienen que la teoría cuántica no se ajusta a la noción de teoría que ellos defienden.

Resulta muy poco plausible que los rasgos de la teoría cuántica que Einstein y otros consideran objetables se eliminen en una teoría futura. Cuando nos enfrentamos con fenómenos inhabituales, por ejemplo, aquellos que se producen a escala atómica o subatómica, no hay razones para esperar que siga vigente la noción según la cual las propiedades de los objetos son independientes de nuestro modo de contemplarlos.

No es sorprendente que topemos con limitaciones en lo que nos hallamos en condiciones de conocer o de predecir. Aunque la ciencia se propone descubrir leyes cuya validez trascienda sus orígenes humanos, jamás es posible conseguir tal objetivo en su totalidad. Nuestros cerebros —y lo que ellos pueden imaginar— han evolucionado de manera que puedan estudiar los fenómenos que se dan a escala humana, y poseemos un sentido intuitivo acerca de los tipos de explicaciones que son posibles a esta escala. Sin embargo, este sentido puede confundirnos cuando estamos tratando con fenómenos inhabituales, a escala de procesos atómicos o subatómicos. En vez de seguir a Einstein en su oposición a la indeterminabilidad característica de la teoría cuántica, deberíamos recordar uno de sus aforismos y maravillarnos de que alguna parte del mundo llegue a sernos conocida.

¿EXISTEN LÍMITES A LA COMPRENSIÓN CIENTÍFICA?

El futuro quizá nos revele otras áreas en las que las leyes de la ciencia pongan límites a nuestra capacidad de entender el mundo. Un ejemplo de ello es un conocido problema «intratable»: la predicción meteorológica. Algunos científicos consideran que las dificultades que plantea esta tarea pronto desaparecerán gracias al desarrollo de nuevos medios para observar desde un satélite grandes zonas de la Tierra, y para efectuar complicados cálculos por computador. Otros científicos creen que algunos aspectos observables de la meteorología seguirán siendo imprevisibles siempre, hasta pocos días antes de los fenómenos en cuestión. Aducen esta imprevisibilidad básica apelando a las ecuaciones que aparentemente rigen, por ejemplo, la temperatura y la humedad de la atmósfera.

Para emplear las ecuaciones que predicen la temperatura y la humedad que habrá en Nueva York la próxima semana, ne-

cesitamos conocer los valores de esas mismas propiedades en el día de hoy y en diversos lugares de todo el mundo. Sin embargo, existe una limitación empírica a la forma en que podemos medir con precisión una magnitud como la temperatura. Cabe esperar que un pequeño error en la medición de la temperatura que hace hoy en París afectará muy poco una predicción cualitativa, por ejemplo, acerca de si lloverá o no la próxima semana en Nueva York, pero al parecer las cosas no son así. Las ecuaciones no lineales que describen la atmósfera son del tipo que posee una solución caótica (noción ya expuesta en el capítulo 6), de manera que dos situaciones apenas diferentes en la temperatura de hoy en París —indiscernibles a través de una medición— pueden llevar a dos patrones meteorológicos muy distintos en la próxima semana en Nueva York. Un científico ha llegado a describir la situación afirmando que el tiempo que haga la semana siguiente en Nueva York quizá dependa del batir de alas de una mariposa, hoy, en París. Aún no sabemos si esto es absolutamente cierto, pero resulta plausible.

Algunos de los fenómenos que los científicos investigan en la actualidad —por ejemplo, los que atañen al sistema nervioso humano— son tan complicados que algunos científicos creen que nunca estaremos en condiciones de comprenderlos en el sentido en que comprendemos un sistema más simple, por ejemplo, un virus.

Al evaluar tales afirmaciones, hemos de distinguir entre las conclusiones basadas en un principio general —tal como el principio de incertidumbre de Heisenberg— que restrinja de modo explícito lo que podemos hacer y conocer, y las conclusiones que se basan en una vaga sensación de que un problema específico es demasiado complejo para que lo comprenda la mente humana. La noción según la cual no podemos predecir el tiempo con demasiada antelación debido a la naturaleza de las ecuaciones que rigen la atmósfera terrestre pertenece a la primera categoría. La afirmación según la cual el sistema nervioso humano escapa a los límites de nuestra capacidad de comprensión corresponde —por el momento— a la segunda categoría. Lo cierto es que aún no sabemos lo suficiente acerca del sistema nervioso como para estar en condiciones de decir si llegaremos algún día a comprenderlo. Para saber que tal cosa es imposible, tendríamos que descubrir algunos aspectos del sistema nervioso que fuesen tan complejos que su comprensión se

resista a cualquier avance de las técnicas experimentales y del análisis matemático. En sí mismo, esto constituiría un descubrimiento de gran trascendencia, comparable al principio de incertidumbre de Heisenberg.

Muchos científicos —entre los que me incluyo— lamentan profundamente que la ciencia futura quizá tope con más restricciones acerca de lo que podemos comprender y predecir. La mayoría de los científicos emprenden sus estudios con la expectativa de ampliar la comprensión humana, y no con la de chocar contra sus limitaciones. En conjunto, la historia de la ciencia ha justificado tal optimismo. Sin embargo, aunque no debamos suponer innecesariamente la aparición de restricciones a los logros de la mente humana, hemos de ser conscientes de la posibilidad de que la imprevisibilidad inherente a la mecánica cuántica sea únicamente la primera señal de una ciencia futura cuyo alcance será más limitado de lo que desearían los científicos.

EL SURGIMIENTO DE NUEVAS CIENCIAS

Un aspecto muy atractivo de la ciencia del futuro consistirá en el surgimiento de nuevas ciencias, acerca de áreas de estudio que en la actualidad no se consideran parte de la ciencia. Estas ampliaciones del ámbito científico tendrán lugar a través del descubrimiento de fenómenos insospechados, tan peculiares que será imposible asignarlos a las categorías científicas previamente aceptadas. Un ejemplo de ello fue la observación de las bacterias que Leeuwenhoek efectuó a través de su microscopio en el siglo XVII. Quizás el descubrimiento de formas de vida extraterrestres desempeñe un papel semejante en el futuro.

También aparecerán nuevas ciencias cuando se reconozca que ciertos aspectos de varias ciencias conocidas tienen suficientes elementos en común como para constituir un campo propio unificado. Tal fusión también puede darse en subcampos de una sola ciencia, o en aspectos de las ciencias que tradicionalmente se habían considerado disciplinas diferentes. Por ejemplo, no se había avanzado mucho en la comprensión del fenómeno del magnetismo hasta que Oersted descubrió que las corrientes eléctricas pueden producir magnetismo. Esto llevó a la nueva ciencia del electromagnetismo, que ha ayudado a solucionar problemas de envergadura en ambos subcampos.

Si deseamos descubrir candidatos a futuras fusiones científicas, hemos de examinar aquellas áreas de la ciencia cuyas lagunas de comprensión son más destacadas. Si los problemas científicos dentro de un campo específico no pueden afrontarse con éxito apelando a los métodos empleados en dicho campo, quizá los fenómenos que se estudian hayan de analizarse dentro del marco de una estructura más amplia de fenómenos, en el seno de una ciencia aún no inventada.

El estudio acerca de cómo el orden evoluciona a partir del desorden es uno de los lugares donde cabe esperar que surja una nueva ciencia. En la ciencia actual hay varios sectores donde se puede comprobar que el orden complejo surge de la sencillez, sin saber por qué ocurre tal cosa. El ejemplo más interesante es el origen de la vida, pero también hemos mencionado otros ejemplos que aparecen en la física y en la química. Estos diferentes ejemplos de desarrollo de un orden son producidos por mecanismos subyacentes muy peculiares. Sin embargo, entre las descripciones matemáticas que se han formulado acerca de cada caso existen relaciones que indican la posibilidad de hallar una descripción unificada para una clase global de fenómenos de este tipo. Dicha descripción sería algo análogo a la termodinámica, que se aplica a muchos fenómenos diferentes, tan variados como la emisión de radiación de una estrella y el flujo de iones a través de una membrana celular. La termodinámica realiza declaraciones de carácter general que rigen todos los procesos en los que se da un flujo de energía y de materia. Una ciencia general de la evolución del orden podría llevar a cabo afirmaciones generales acerca de la evolución del orden en diversas circunstancias. Estas leyes generales quizá no determinen por completo la evolución del orden en las distintas circunstancias, al igual que las leyes de la termodinámica tampoco determinan cómo fluye la energía en todos los contextos posibles. Sin embargo, una vez que se disponga de tales leyes generales, podrían brindarnos los principios suplementarios que se necesitan para caracterizar por completo los casos individuales.

Una ciencia del orden puede surgir si entrelazamos una serie de factores. Uno de ellos consiste en el estudio de las ecuaciones diferenciales no lineales, que ofrecen criterios referentes al surgimiento del orden en diversas circunstancias. Otro elemento es la termodinámica, que en alguna de sus modernas versiones contiene nociones acerca de cómo un flujo de energía que incide desde fuera sobre un sistema puede causar en éste una evolución que incremente el orden existente. Otro de los factores aparece en el estudio experimental de fenómenos como el láser, en los que interviene la evolución del orden.

En la nueva ciencia del orden que nos hace falta existe un ingrediente peculiar: un principio general que exprese cuándo evolucionará un sistema en dirección a un mayor orden. Conocemos algunos de los requisitos necesarios para que ocurra esto, por ejemplo, un suministro externo de energía. También conocemos algunas de las condiciones bajo las cuales tendrá lugar esta evolución. Sin embargo, nadie ha encontrado un modo general de identificar cuáles son los sistemas que se convertirán en ordenados y cuáles no. Si cabe formular tal principio, indicará la existencia de relaciones entre sistemas formados por componentes diversos, pero que se someten a tipos paralelos de evolución.

Una nueva ciencia del orden nos ayudará a encontrar respuestas a numerosos problemas científicos de importancia, por ejemplo, cómo se originó la vida sobre la Tierra y cómo se desarrollan organismos complejos a partir de una sola célula. También servirá para indicar posibilidades de orden complejo, que sean diferentes a las que ya hemos descubierto. Entre éstas podrían incluirse las formas de vida que quizá prosperen en entornos inhabitables para la vida que conocemos. Quizás incluyan asimismo nuevos tipos de orden inorgánico que podríamos construir, aunque no se diesen naturalmente.

Una nueva ciencia del orden poseerá notables ramificaciones en la ciencia en conjunto, y modificará la visión del mundo que tienen los científicos, quizá de un modo tan radical como la relatividad y la mecánica cuántica en su momento.

LA DESAPARICIÓN DE ANTIGUAS CIENCIAS

Las ciencias también pueden desaparecer, tanto como surgir. Así ocurrió con la frenología y la astrología, cuando se descubre que una «ciencia» carece de sentido. De manera más frecuente, una ciencia antes considerada como autónoma puede fusionarse con otra ciencia. Esto ocurrió en el siglo XVII con el estudio astronómico de los movimientos planetarios, que se convirtieron en parte de la física; sucedió en el siglo XIX con la

óptica, que se integró en la electrodinámica; y ha pasado en el siglo XX con gran parte de la química inorgánica, que se ha transformado en parte de la física atómica. En tales fusiones no se pierde el contenido de la ciencia subsumida. En realidad, a través de la nueva combinación pueden solucionarse algunos de sus problemas más acuciantes.

Cuando la aplicación de los métodos de una ciencia permite estudiar con más eficacia la materia de otra disciplina, los científicos deberían considerar que tal cosa constituye un avance. Esto ocurrirá con toda la química en un futuro próximo. Ya se hace evidente que todos los fenómenos que interesan a los químicos son una manifestación de la estructura electrónica de los átomos y las moléculas. Sin embargo, esto no significa que vaya a desaparecer el contenido de estudio de la química, o que los químicos tengan que lamentarse. Por el contrario, los científicos que ahora se llaman químicos a sí mismos utilizarán cada vez más las nociones y las técnicas experimentales de la física para estudiar las cuestiones que les conciernen. Ya hay muchos químicos cuyas investigaciones son casi imposibles de distinguir de las que llevan a cabo algunos físicos. La química y la física acabarán por no distinguirse en sus nociones y sus técnicas, sino únicamente por los problemas a los que éstas se aplican. En ese momento, habrá una única ciencia de la materia y la energía, que probablemente seguirá llamándose física, pero con numerosas ramas que sirvan para estudiar los diversos aspectos de la materia y la energía.

Aunque en un futuro lejano la biología llegue a subsumirse en la física, los biólogos no necesitan defenderse contra la perspectiva de que su ciencia vaya pronto a fusionarse con la física, como en el caso de la fusión entre química y física. Diversos aspectos del comportamiento de los seres vivientes *han* sido comprendidos mediante modelos físicos, que involucran a las propiedades de las moléculas de ácido nucleico y de proteínas. El proceso de encontrar explicaciones físicas a los fenómenos biológicos continuará en el futuro. Sin embargo, es improbable que pronto estemos en condiciones de comprender todas las actividades de los organismos complejos limitándonos a aplicar las nociones de la física.

Lo que ocurrirá es que un porcentaje creciente de las nociones y las técnicas utilizadas por los biólogos tendrá su origen en la química y en la física. Si las ideas procedentes de la física

logran dar cuenta de los fenómenos que interesan a los biólogos, éstos las adoptarán. Si las ideas que los biólogos están en condiciones de generar sin hacer referencia a la física tienen más éxito, entonces los futuros biólogos las continuarán utilizando. El criterio último del valor de una noción científica no es su origen, sino su capacidad para explicar los fenómenos que se estudien.

Existe un modo más conflictivo de desaparecer una parte de una ciencia. Cuando un nuevo modo de explicación se introduce en una rama de la ciencia —por ejemplo, cuando las explicaciones moleculares de la herencia empezaron a utilizarse en genética— a menudo quedan problemas sin resolver y a los cuales no se les da importancia. A veces se cae en la cuenta de que el viejo problema no puede resolverse en absoluto, y de que es correcto dejarlo a un lado, como sucedió en física con la pregunta acerca de qué órbitas recorre un electrón en un átomo. Por lo general, sin embargo, no está involucrada una cuestión referente a un principio científico. Al contrario, los científicos se concentran en aquellas áreas de su campo que pueden vincularse mejor con el nuevo modo de pensar. En ocasiones se deciden a «desempolvar» los temas más antiguos, pero lo más frecuente es que haya tanto material nuevo para estudiar que los problemas viejos sin solucionar se dejan a un lado.

La ciencia es una actividad que lleva a cabo una cantidad finita de personas, en un momento determinado. Estos científicos sólo pueden concentrar sus esfuerzos en aquellos problemas que tengan un máximo interés para su comunidad, y que a menudo son los generados por los descubrimientos más recientes. No suele haber demasiados incentivos para estudiar la aplicación de nuevas ideas a problemas viejos, excepto cuando estos problemas son tan célebres o tan importantes que permanecen en la conciencia de todos los que trabajan en dicho campo.

Esta tendencia se ha visto fomentada por la inmensa expansión de la información científica. A medida que se saben más cosas y surgen nuevos interrogantes, los científicos están en condiciones de aprender una parte cada vez más reducida de lo que se sabe, y sólo pueden dedicarse a un segmento cada vez más estrecho de su materia de estudio. Una consecuencia de ello es que, cuando no ha habido un cambio radical de ideas, los científicos se concentran en las partes de su campo que se han descubierto más recientemente, y las cuestiones más acu-

ciantes del pasado —aunque también sea muy reciente— tienden a olvidarse. Por lo tanto, la ciencia se enfrenta a cierto peligro de perder su carácter de cuerpo acumulativo de conocimientos.

Esta tendencia no es un fenómeno nuevo, pero en los últimos tiempos se ha acelerado. Los investigadores citan artículos o libros que se han publicado hace muy pocos años. En mi propio campo de la física teórica de las partículas, muchas de las citas se refieren a artículos que sólo se han distribuido como preimpresiones. Uno de los motivos de esta reducción del ámbito de intereses de los científicos es que muchos problemas se resuelven con rapidez, una vez que han sido planteados de manera adecuada. Sin embargo, el deseo de muchos científicos de trabajar en los mismos problemas que sus colegas es probablemente un factor más significativo.

Ciertas tendencias podrían suavizar la práctica de dejar a un lado la ciencia del pasado. Una de ellas es el enorme aumento en la capacidad de almacenar, analizar y convertir en accesible la información a través del empleo de bancos de datos informáticos. Cuando se haya constituido la red informática universal, será posible disponer de toda la bibliografía científica del pasado. Esto eliminará una de las barreras que obstaculizan el empleo de la «vieja» ciencia, pero persistirá el problema de traducir los conceptos del pasado al lenguaje científico del presente. Esto podría ser un excelente proyecto de traducción por medio de computador, ya que para éste sería más fácil de captar la sintaxis y el vocabulario de la ciencia, más precisos que los del lenguaje ordinario.

Sin embargo, la barrera más considerable para la continuidad del interés científico consiste en la falta de preocupación acerca de este problema. Para superarla se requiere una adecuada educación científica, y la existencia de un sistema de gratificaciones en la ciencia. Si a los científicos jóvenes se les enseña a preocuparse por las cuestiones no solucionadas en el pasado, y a quienes trabajan en estos temas se les premia de manera conveniente cuando logran contestar uno de tales interrogantes, habrá una continuidad en la investigación científica. Si no ocurre tal cosa, la ciencia vivirá cada vez más en el presente, y los trabajos efectuados por cada generación de científicos carecerán de importancia para la generación siguiente. Esto sería un final triste para lo que ha constituido hasta ahora

el más satisfactorio esfuerzo humano de edificar una estructura intelectual que permanezca a lo largo de las generaciones.

Acabo este examen de la ciencia del futuro con una actitud relativamente optimista acerca de lo que nos traerá el porvenir. En la ciencia hay muchos problemas importantes sin solucionar, y existen razonables perspectivas de que algunos de ellos se solucionarán pronto. Sobre la ciencia actúan fuerzas que transformarán el modo de hacer ciencia. Se están desarrollando nuevas técnicas para obtener información acerca de la naturaleza, y esto nos permitirá efectuar nuevos descubrimientos, tan apasionantes e inesperados como cualquiera de los grandes descubrimientos del pasado. Los presentes y futuros hallazgos científicos están en condiciones de crear nuevas tecnologías físicas y biológicas que pueden transformar la vida humana. Todo esto constituye la brillante perspectiva de la ciencia del futuro.

LECTURAS ADICIONALES

En esta sección describiré algunas referencias bibliográficas que me han sido útiles en relación con los temas expuestos en el texto. El lector que desee conocer más cosas con respecto a estas cuestiones puede consultarlas.

Introducción

Página 2. Vannevar Bush preparó en 1945 un informe en el que se proponían una serie de pasos en el apoyo oficial a la ciencia pura. Estas propuestas han guiado en gran parte la política gubernamental de los Estados Unidos con respecto a la investigación científica durante el período posterior a la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, dicho informe no se esforzó por prever los efectos del programa que sugiere en el futuro de la ciencia. Véase *Science, The Endless Frontier*, de Vannevar Bush; United States Government Printing Office, Washington, D.C., 1945.

Página 2. La definición de ciencia que he dado debe mucho a las ideas de Ernest Nagel, tal como se describen en el capítulo 1 de *The Structure of Science* (Harcourt, Brace and World: Nueva York, 1961).

Página 6. En su artículo «Radioactivity, Two Early Puzzles», *Reviews of Modern Physics*, vol. 49, p. 925, 1977, Abraham Pais resume la historia inicial de la radiactividad y algunos de los interrogantes que plantea.

Página 7. Horace F. Judson, en el capítulo 9 de *The Eighth Day of Creation* (Simon and Schuster: Nueva York,

1979), expone algunos aspectos de la historia de las aplicaciones biológicas de la cristalografía de rayos X.

Página 7. La analogía de la red del pescador con el descubrimiento científico Eddington la expone en el capítulo 2 de su libro *The Philosophy of Physical Science* (Macmillan: Nueva York, 1939). La mayor parte de los demás científicos no aceptan las conclusiones que él extrae de dicha analogía, en favor de un papel primordial de las consideraciones *a priori* dentro del ámbito científico.

Página 7. En un artículo de *National Geographic*, volumen 156, p. 689, 1979, R. D. Bullard y J. I. Grassie describen el fascinante descubrimiento del medio ambiente que se da en el fondo del océano.

Página 8. La posibilidad de que en la Tierra haya otras formas de vida que tengan una bioquímica muy diferente se expone en un libro de Gerald Feinberg y Robert Shapiro: *Life Beyond Earth* (William Morrow: Nueva York, 1980).

Página 8. En el capítulo 25 de *The Evolution of Scientific Thought*, de A. d'Abro (Dover Publications: Nueva York, 1950), aparece una exposición legible del análisis de tensores y sus aplicaciones en la física.

Página 8. Su inventor, René Thom, expone la teoría de las catástrofes en *Structural Stability and Morphogenesis* (W. A. Benjamin: Reading, Mass., 1975).

Página 11. La perspectiva de Newton se describe en el escolio general del libro II de sus *Principia*. La de Einstein aparece en su conferencia «On the Method of Theoretical Physics», reimpresa en *Ideas and Opinions* (Crown Publishers: Nueva York, 1954).

Página 12. Aún no se ha escrito una historia detallada sobre esta época de la física de partículas. Algunos aspectos de dicha historia aparecen en las conferencias de Premios Nobel en 1979, pronunciadas por Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg, y reimpresas en *Reviews of Modern Physics*, vol. 52, pp. 515-544, 1980.

Capítulo 1

Página 22. Ciertos pormenores referentes a las partículas subatómicas y a otros temas expuestos en este capítulo pueden encontrarse en *The Cosmic Code*, de Heinz Pagels (Simon and Schuster: Nueva York, 1982) y en *What Is the World Made Of?*, de Gerald Feinberg (Doubleday-Anchor Press: Garden City, 1977).

Página 25. En Steven Weinberg, *The First Three Minutes* (Basic Books: Nueva York, 1977), se expone el tema de la expansión del Universo y otras cuestiones cosmológicas.

Capítulo 2

Página 47. En sus publicaciones originales puede encontrarse una descripción de los métodos que emplean los biólogos. En *Modern Biology*, editado por Elof Carlson (George Braziller: Nueva York, 1967), se ha reimpreso un conjunto de artículos importantes sobre la historia de la biología.

Página 47. La obra de James Watson, *Molecular Biology of the Gene*, 3.ª ed. (W. A. Benjamin, Inc.: Menlo Park, 1976), es una introducción clara y autorizada a la biología molecular.

Página 50. Los rasgos de las células, la manera en que se desarrollan y los mecanismos de control que actúan en su interior se describen con claridad en *Mechanisms of Development*, de Richard Ham y Marilyn Veomatt (C. V. Mosby Company: St. Louis, 1980).

Página 52. *The Meaning of Evolution* (Yale University Press: New Haven, 1950), de George Simpson, es una introducción clásica a la evolución darvinista. Niles Eldredge y Stephen Gould —en su artículo «Punctuated Equilibria: an alternative to phyletic gradualism», publicado en *Models in Paleobiology*, editado por T. Schopf y J. Thomas (Freeman: San Francisco, 1972)— dan una visión un tanto diferente sobre la manera en que surgen los grandes cambios en los seres vivos.

Página 53. Las opiniones de Gilbert sobre el papel evolucionista de los intrones se expone en el artículo «Why Genes in Pieces?», en *Nature*, vol. 271, p. 501, 1978.

Página 53. La noción de evolución como serie de remiendos es expuesta por François Jacob en *The Possible and the Actual* (Pantheon Books: Nueva York, 1982).

Página 54. Lynn Margulis, en *Early Life* (Science Books International: Boston, 1982), analiza algunos de los argumentos que llevan a considerar las células eucarióticas como asociaciones simbióticas.

Página 57. El concepto de biosfera se expone en los artículos de *Scientific American*, vol. 223, n.° 3, 1970. Véase también el capítulo 3 de Feinberg y Shapiro, *Life Beyond Earth*. J. Lovelock, en *Gaia — A New Look at Life on Earth* (Oxford University Press: Londres, 1979), expone la idea de que la biosfera es un superorganismo.

Página 59. En su influyente libro *What Is Life* (Cambridge University Press: Cambridge, 1944), Erwin Schrödinger examinó el papel de las desviaciones con respecto al equilibrio y de las fuentes externas de energía para la conservación de la vida. Véase también H. Morowitz, *Energy Flow in Biology* (Academic Press: Nueva York, 1968).

Capítulo 3

Página 65. En el capítulo 2 de Feinberg, *What Is the World Made Of?*, op. cit., se examinan los descubrimientos de Rutherford, Thomson y otros.

Página 66. Las opiniones de Gunther Stent sobre el futuro de la ciencia aparecen en su libro *Paradoxes of Progress* (W. H. Freeman and Company: San Francisco, 1978). Ver también su libro *The Coming of the Golden Age* (The Natural History Press: Garden City, 1969).

Página 68. En los capítulos 4 y 5 de *The Evolution of Scientific Thought*, op. cit., se describen los cambios que han tenido lugar en nuestra visión acerca del espacio y el tiempo.

Página 69. En *Black Holes and Warped Spacetime*, de William Kaufmann, III (Bantam Books: Nueva York, 1980), se exponen con claridad algunas de las propiedades de los agujeros negros. Los problemas que le plantea a la física la pérdida de información acerca de la formación de agujeros negros han sido puestos de relieve por John Wheeler, en «Geometrodynamics and the Issue of the Final State», publicado en *Relativity, Groups and Topology*, editado por C. DeWitt y B. S. DeWitt (Gordon and Breach: Nueva York, 1964).

Página 76. El trabajo de Tsung-dao Lee es descrito por él mismo y por Richard Friedberg en su artículo conjunto «Discrete Quantum Mechanics», en *Nuclear Physics*, B vol. 225, pp. 1-52, 1983. Este artículo es más técnico que la mayoría de las lecturas que se sugieren en esta sección.

Página 76. Michael Creutz, en su artículo «High Energy Physics», de *Physics Today*, vol. 36, pp. 35-42, mayo 1983, expone el empleo de los computadores para efectuar cálculos correspondientes a las teorías del campo cuántico.

Página 83. Algunos trabajos recientes sobre la dimensionalidad del espacio-tiempo se exponen en un artículo de Edward Witten que lleva el título de «Search for a Realistic Kaluza-Klein Theory», y que se publicó en *Nuclear Physics*, B vol. 186, p. 412, 1981. Este artículo es más técnico que la mayoría de las lecturas que se sugieren en esta sección.

Página 84. Paul Davies, en *The Physics of Time Asymmetry* (University of California Press: Berkeley, 1974), analiza con claridad algunos de los temas involucrados en la direccionalidad del tiempo.

Página 85. En Feinberg, *What Is the World Made Of?*, op. cit., aparece una exposición referente a la simetría de la inversión temporal y a ciertas pequeñas desviaciones con respecto a ella, que han sido descubiertas por los físicos que estudian las partículas.

Página 89. Algunas de las nociones sobre las etapas primitivas del Universo se analizan en Weinberg, *The First Three Minutes*, op. cit.

Página 95. Freeman Dyson, en su artículo «Time Without End — Physics and Biology in an Open Universe», de *Reviews of Modern Physics*, vol. 51, p. 447, 1979, efectúa un reciente análisis del futuro a largo plazo del Universo. Véase también el artículo de Stephen Frautschi, «Entropy in an Expanding Universe», en *Science*, vol. 217, p. 593, 1982.

Página 102. Los procesos físicos que tienen lugar en un Universo en expansión indefinida son expuestos por Don Page y M. R. McKee en su artículo «Matter Annihilation in the Late Universe», en *Physical Review D*, vol. 24, p. 1458, 1981.

Página 103. Alan Guth, en su artículo «Speculations on the Origin of the Matter, Energy and Entropy of the Universe», publicado en *Asymptotic Realms of Physics*, editado por A. Guth y K. Juang (M.I.T. Press: Cambridge, 1983), expone la noción de Universo inflacionista.

Página 113. Una ilustrada argumentación sobre la noción de simetría en la ciencia y en la matemática puede encontrarse en *Symmetry*, de Hermann Weyl (Princeton University Press: Princeton, 1952).

Capítulo 4

Página 120. L. E. Orgel, en *The Origin of Life: Molecules and Natural Selection* (John Wiley and Sons: Nueva York, 1973), ofrece una descripción de las opiniones más generalizadas acerca del origen de la vida. En *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life* (Cambridge University Press: Cambridge, 1982), de A. G. Cairns-Smith, aparece una interesante alternativa. Véase también Feinberg y Shapiro, *Life Beyond Earth*, op. cit.
Página 125. En Ham y Veomatt, *Mechanisms of Development*, op. cit., puede verse un panorama general de lo que se conoce acerca del desarrollo biológico y un examen de los problemas más destacados que plantea dicha cuestión.
Página 126. En *Fundamental Programming Concepts*, de J. L. Gross y W. S. Brainerd (Harper and Row: Nueva York, 1972), se expone el concepto de ordinograma y otras maneras de representar un programa.
Página 134. Thom, en *Structural Stability and Morphogenesis*, op. cit., presenta un interesante enfoque alternativo a la morfogénesis.
Página 135. B. L. Strehler, en *Time, Cells and Aging* (Academic Press: Nueva York, 1962), ofrece un análisis legible de lo que se sabe acerca del envejecimiento y algunas de las principales teorías sobre este fenómeno. En el *Handbook of the Biology of Aging*, de C. Finch y L. Hayflick (Van Nostrand Reinhold Co.: Nueva York, 1977), aparece un resumen más reciente sobre el particular.
Página 142. El modelo evolucionista del envejecimiento, que propone P. Medawar, se describe en el artículo «Old Age and Natural Death», reimpreso en su libro *The Uniqueness of the Individual* (Dover Publications: Nueva York, 1981).

Capítulo 5

Página 152. El físico norteamericano Kip Thorne, en su artículo «Gravitational Wave Research», *Reviews of Modern Physics*, vol. 52, p. 285, 1980, ofrece un resumen de las propiedades que cabe esperar en las ondas gravitatorias, y menciona algunos trabajos que se llevan a cabo en la actualidad para detectarlas.

Página 164. En varios artículos publicados en las *Proceedings of the 1980 DUMAND Symposium*, editadas por V. J. Stegner (Hawaii Dumand Center: 1980), se describe el detector DUMAND.
Página 168. En su artículo «Microholography of Living Organisms», *Science*, vol. 218, p. 229, 1982, J. C. Solem y G. C. Baldwin describen el proceso de la holografía, en especial en sus posibles aplicaciones al estudio de los procesos vitales.

Capítulo 6

Página 178. Saloman Bochner, en *The Role of Mathematics in the Rise of Science* (Princeton University Press: Princeton, 1981), describe la historia del empleo de la matemática en la ciencia.
Página 183. Las opiniones y el programa de Thom se exponen en *Structural Stability and Morphogenesis*, op. cit.
Página 185. La obra principal de D'Arcy Thompson es su libro *On Growth and Form* (Cambridge University Press: Cambridge, 1942). Una obra más reciente que versa sobre temas semejantes es *Patterns in Nature* (Atlantic-Little Brown: Boston, 1974), de Peter Stevens.
Página 188. Dos artículos legibles sobre el caos han aparecido recientemente en la revista *Physics Today*. «How Random Is a Coin Toss?», de Joseph Ford (vol. 36, p. 40, abril de 1983), se centra en la imprevisibilidad de las soluciones de las ecuaciones no lineales. Leo Kadanoff, en su artículo «Roads to Chaos» (vol. 36, p. 46, diciembre de 1983), describe posibles aplicaciones de la conducta caótica a los sistemas físicos reales.
Página 191. En Hermann Haken, *Synergetics, an Introduction* (Springer-Verlag: Berlín, 1978), se describen algunas generalizaciones acerca de la forma en que puede surgir el orden en diversas situaciones.
Página 194. No tengo conocimiento de ninguna exposición acerca de los *twistors* que resulte apropiada para un lector no especializado. Aquellos lectores que tengan una sólida formación matemática pueden encontrar ejemplos de la investigación actual sobre los *twistors* en *Twistor Newsletter*, que distribuye de forma privada el *Mathematical Institute* de la Universidad de Oxford.

Página 199. En *The Mathematical Experience*, de Philip Davis y Reuben Hersh (Houghton Mifflin Company: Boston, 1982), se examinan los diversos enfoques de los matemáticos y los filósofos acerca del origen de las nociones matemáticas. Otra aproximación es la que expone Philip Kitchen en *The Nature of Mathematical Knowledge* (Oxford University Press: Nueva York, 1983).

Capítulo 7

Página 208. El método de cálculo Montecarlo se expone en el libro *Monte Carlo Methods*, de J. Hammersley y D. Handscomb (Methuen: Londres, 1965).

Página 210. Feigenbaum describe su descubrimiento en un artículo titulado «Universal Behavior in Non-Linear Systems», publicado en *Los Alamos Science*, vol. 1, p. 4, 1980.

Página 211. En el artículo «Steps Toward Computer Analysis of Nucleotide Sequences», publicado en *Science*, vol. 209, pp. 1322-28, 1980, T. R. Gingeras y R. J. Roberts estudian ciertos aspectos del empleo de computadores en la secuenciación de las biomoléculas.

Página 216. Ya ha sido desarrollado un programa informático para efectuar estas investigaciones baconianas. Se describe en el artículo «Studying Scientific Discovery by Computer Simulation», de G. Bradshaw, P. Langley y H. Simon, publicado en *Science*, vol. 222, p. 971, 1983.

Página 218. En el artículo «The Use of Concurrent Processors in Science and Engineering», de Geoffrey Fox y Steve Otto, *Physics Today*, vol. 37, p. 53, mayo de 1984, se describen algunas de las nociones que implica el procesamiento en paralelo.

Página 218. El enfoque Columbia de procesador en paralelo con respecto a los cálculos de la interacción quark-gluón fue diseñado por los físicos norteamericanos Norman Christ y Anthony Terrano. Se describe en su artículo «A Very Fast Parallel Processor», publicado en *IEEE* Transactions on Computers, vol. C-33, 344, 1984.

Página 220. En *Computers and Thought*, de J. Feldman y E. Feigenbaum (McGraw-Hill: Nueva York, 1963), aparece un resumen de los trabajos iniciales sobre inteligencia artificial. Parte de los trabajos e investigaciones más recientes se describen en el perfil de Marvin Minsky realizado por Jeremy Bernstein, reimpreso en su libro *Science Observed* (Basic Books: Nueva York, 1982).

Capítulo 8

Página 227. La obra de Babbage se describe en *The Analytical Engine*, de Jeremy Bernstein (William Morrow and Co.: Nueva York, 1981). Ver también *Charles Babbage and His Calculating Engines*, de P. y E. Morrison (Dover Publications: Nueva York, 1961).

Página 228. Mis ideas acerca de cómo hay que decidir si se emplea una tecnología específica —y la manera en que se emplee— aparecen en mis libros anteriores: *The Prometheus Project* (Doubleday: Nueva York, 1969) y *Consequences of Growth* (Seabury: Nueva York, 1977).

Página 231. En *Physics of Dense Matter*, editado por C. Hansen (D. Reidel Publishing Co.: Dodrecht, Holanda, 1974) puede verse un resumen de las propiedades de diversos tipos de materia colapsada.

Página 232. La conferencia de Feynman se publicó en el libro *Miniaturization*, editado por H. D. Gilbert (Reinhold: Nueva York, 1961). Un análisis reciente de ideas semejantes aparece en el artículo «Molecular Engineering», de K. Eric Drexler, en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 78, p. 5275, 1981.

Página 236. Alec Broers describe algunas de las depuradas técnicas que se utilizan en la actualidad en microingeniería, en su artículo «High Resolution Systems for Microfabrication», aparecido en *Physics Today*, vol. 32, p. 38, noviembre de 1979.

Página 238. K. Ulmer, en su artículo «Protein Engineering», publicado en *Science*, vol. 219, p. 666, 1983, estudia la posibilidad de diseñar proteínas para que efectúen funciones específicas.

Página 247. En Feinberg, *Consequences of Growth*, op. cit., se mencionan ciertas nociones sobre las consecuencias sociales que tendría una tecnología para el control del envejecimiento. Ver también *Conquest of Death*, de Alvin Silverstein (Macmillan: Nueva York, 1979).

Capítulo 9

Página 249. D. de Solla Price, en su libro *Science Since Babylon* (Yale University Press: New Haven, 1962), formula una descripción referente a algunos de los cambios cuantitativos que tuvieron lugar en la ciencia hasta 1961. En el *U. S. Statistical Abstract* (Government Printing Office: Washington, D.C., 1983) pueden encontrarse datos más recientes.
Página 254. J. Watson, en *La doble hélice* (Biblioteca Científica Salvat, Barcelona, 1987), describe de una forma muy adecuada los aspectos competitivos de la primitiva biología molecular.
Página 254. Una de las primeras revistas epistolares que se creó fue *Physical Review Letters*, que comenzó a publicarse en 1958. Ha continuado siendo una de las revistas científicas más citadas, y han surgido muchos imitadores de ella.
Página 254. Patrick Moore, en *Watchers of the Skies* (G. P. Putnam's Sons: Nueva York, 1974), describe una de las cifras de Galileo, en la página 158.
Página 256. En el *U. S. Statistical Abstract*, op. cit., pueden hallarse datos sobre los recursos económicos que se dedican a la ciencia en los Estados Unidos.
Página 260. Jeremy Bernstein, en *Three Degrees above Zero* (Scribners: Nueva York, 1984), describe la investigación científica que se lleva a cabo en los *Bell Laboratories*. En su autobiografía, *Haphazard Reality* (Harper and Row: Nueva York, 1983), H. Casimir expone la investigación que se efectúa en el *Philips Laboratory*.
Página 263. En *Science*, 30 de marzo de 1984, p. 1379, se describe una red informática que se está desarrollando entre los biólogos moleculares que trabajan en la secuenciación del ADN.
Página 263. En su libro *The Fifth Generation* (New American Library: Nueva York, 1984), E. A. Feigenbaum y P. McCorduck describen la red informática entre diseñadores de microchips.

Capítulo 10

Página 279. El físico británico lord Kelvin fue quizás el defensor más acérrimo de los modelos mecanicistas. Véanse sus *Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light* (Baltimore, 1884). El físico francés Pierre Duhem, en su libro *The Aim and Structure of Physical Theory* (Atheneum: Nueva York, 1962), dio una respuesta negativa —desde el punto de vista de un científico del siglo XIX— al empleo de modelos mecanicistas.
Página 279. En la novela *Night Thoughts of a Classical Physicist* (Harvard University Press: Cambridge, 1982), R. McCormmach lleva a cabo una hermosa descripción relativa a una manera de pensar que se daba en los físicos teóricos de principios del siglo XX.
Página 281. Einstein expone su enfoque acerca de la forma que tendría que asumir la física teórica en el libro *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, editado por P. Schilpp (The Library of Living Philosophers: Evanston, 1949).
Página 282. En su artículo «Deterministic Non-Linear Flow», publicado en *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 20, p. 130, 1963, E. N. Lorenz plantea los problemas que implica la previsión meteorológica a largo plazo, debido a la inestabilidad de las ecuaciones que intervienen en la cuestión.
Página 284. En H. Haken, *Synergetics, an Introduction*, op. cit., se describen algunos pasos hacia una futura ciencia del orden.

LECTURAS ADICIONALES

GLOSARIO

Ácidos nucleicos. Uno de los dos tipos (ADN y ARN) de sustancia biológica que son polímeros de bases orgánicas simples, dispuestas sobre un eje central de moléculas de azúcar y de fosfatos. En sus formas biológicamente activas, el ADN suele contener dos cadenas en forma de doble hélice, mientras que el ARN sólo tiene una.

Agujero negro. Objeto cuya gravedad es tan fuerte que no puede escapar de él nada que se le aproxime. Puede considerarse que los agujeros negros constituyen un nuevo tipo de materia, que a veces se produce al comprimirse la materia corriente.

Aminoácidos. Compuestos orgánicos simples, que contienen nitrógeno, carbono, hidrógeno y oxígeno, y que son los monómeros de las cadenas de polímeros que forman las proteínas.

Anticuerpo. Una de las numerosas proteínas producidas por los animales superiores, que pueden reaccionar ante las sustancias extrañas que haya dentro del cuerpo, con objeto de neutralizarlas.

Antineutrinos. Antipartículas de los neutrinos, que se distinguen de éstos por la orientación relativa del espín y de la velocidad.

Antipartícula. Para cada tipo conocido de partícula subatómica, existe un tipo de partícula con la misma masa, pero con car-

ga eléctrica opuesta. Los dos tipos que se hallan relacionados de este modo se denominan recíprocamente antipartículas. Las primeras antipartículas que se descubrieron fueron los electrones y los positrones.

Antiquark. Tipo de partículas subatómicas, que son antipartículas de los quarks correspondientes. Los antiquarks se unen a los quarks para producir hadrones inestables, que reciben el nombre de mesones.

Autoensamblado. Organización espontánea de los componentes de una estructura —los ribosomas, por ejemplo— para producir dicha estructura.

Big Crunch. Si el Universo es finito, la actual expansión terminará en algún momento y será sustituida por una contracción, que a su vez reproducirá las condiciones de alta densidad y temperatura que existían cuando se formó el Universo. Esta situación ha sido denominada *Big Crunch*, en contraste con el *Big Bang*.

Biosfera. Conjunto de todos los materiales que existen sobre la superficie de la Tierra y que intervienen en los ciclos biológicos.

Campo clásico. Un campo clásico es una cantidad matemática que describe una región del espacio en la cual actúan fuerzas eléctricas o magnéticas sobre determinados objetos.

Campo cuántico. Cantidad matemática que se utiliza en la teoría cuántica para describir nuestra más profunda comprensión de la naturaleza. Los campos cuánticos se pueden manifestar como partículas subatómicas, o como regiones del espacio en las que las partículas tienen propiedades diferentes a las que tendrían en un espacio vacío.

Caos. Tipo de comportamiento de los sistemas físicos en el cual la evolución del sistema no puede predecirse, ya que depende en gran medida de cambios secundarios en las propiedades del sistema.

Catalizador. Sustancia química que acelera el ritmo de una reacción entre otras sustancias, sin que sea consumida en dicha reacción.

Catástrofes, teoría de las. Rama de la matemática que se emplea para describir el cambio repentino de las cantidades, cuando cambia ligeramente uno de los parámetros de los cuales dependen.

Células transformadas. Células que han sido sometidas a un cambio genético que les permite dividirse indefinidamente.

Cigoto. Óvulo fecundado antes de que empiece a dividirse.

Conectividad. Descripción acerca de cómo se unen entre sí los puntos del espacio, y que forma parte de la materia de estudio de la rama de la matemática denominada topología.

Cosmología. Estudio del Universo en conjunto, sobre todo en lo que tiene que ver con su origen y su desarrollo.

Cromatina. Material existente en el núcleo de la célula, compuesto de ácido nucleico y determinadas proteínas, con una complicada disposición geométrica.

Cromodinámica cuántica (CDC). Teoría del campo cuántico que describe las interacciones de los campos correspondientes a los quarks y los gluones, y que se supone que explica las propiedades de los hadrones.

Cuantización. Proceso matemático por el cual las ecuaciones de una teoría precuántica cambian a las ecuaciones correspondientes de la teoría cuántica. Un frecuente resultado de la cuantización es que una propiedad que en la teoría precuántica podía variar de manera continua —el espín, por ejemplo— ahora sólo asume valores discretos.

Cuerpo negro. Objeto que absorbe todas las radiaciones que inciden sobre él, sea cual fuere su longitud de onda, y que a su vez emite un patrón específico de radiación, que depende de su temperatura.

Cultivo celular. Grupo de células que crecen fuera de un organismo, por lo general en un medio de desarrollo parcialmente artificial.

Curvatura. Propiedad de todo espacio matemático, que mide el grado en que se desvía de un espacio euclidiano, o «plano».

Decadencia. Cambio espontáneo de una partícula en otra, con una masa menor. Según la teoría cuántica, no puede predecirse el tiempo exacto en que decaiga una partícula individual.

Desarrollo. Proceso por el cual un organismo celular atraviesa las diversas etapas de su vida, comenzando como óvulo fecundado y acabando con la muerte.

Determinista. Se dice que una ley es determinista si —cuando una cantidad física posee un valor específico en un momento dado— dicha ley permite la predicción del valor que tendrá esa cantidad en un momento posterior. Las leyes de la física newtoniana son deterministas, mientras que las de la física cuántica no lo son.

Diferenciación celular. Proceso a través del cual las células de un organismo multicelular asumen diversos papeles, que suelen tener un comportamiento químico diferente.

Dimensiones. En cualquier espacio matemático, todo punto puede distinguirse de todos los demás, especificando una cantidad fija de coordenadas numéricas. Esta cantidad fija se denomina dimensión del espacio. En el espacio físico ordinario, dicha cantidad es tres, mientras que en el espacio-tiempo de la relatividad especial existen cuatro dimensiones, porque —además de las coordenadas espaciales— se especifica una coordenada temporal para cada acontecimiento.

Discreto. Se dice que un conjunto de objetos matemáticos o físicos es discreto si existen vacíos entre los objetos, como ocurre entre los números enteros o entre los átomos de un cuerpo sólido.

Dislocaciones. Lugares, dentro de un cristal, donde los átomos no asumen la misma estructura regular que caracteriza al resto del cristal.

Dispersión. Proceso en el cual cambia una propiedad de una partícula o una onda, por ejemplo, el momento lineal, como consecuencia de un objeto que actúa como blanco de destino. Por ejemplo, cuando una onda incide sobre un blanco, la dirección de la onda puede cambiar como consecuencia de la dispersión.

Dispersión coherente. Proceso de dispersión en el que actúan juntos todos los átomos de un objeto, para producir un efecto considerable en la dispersión de una partícula o una onda.

Ecuaciones no lineales. Ecuaciones en las que la potencia al cuadrado o superior de la cantidad —cuya variación describe la ecuación— entra en uno de los términos de la ecuación.

Electrodinámica cuántica (EDC). Teoría del campo cuántico que describe las interacciones entre los campos correspondientes a los electrones o a otras partículas con carga, y el campo electromagnético. La EDC proporciona una explicación muy exacta acerca de las propiedades de los átomos.

Electrón. La partícula subatómica de menos peso y que lleva carga eléctrica. Los electrones son uno de los componentes del átomo en la materia corriente.

Embriogénesis. Fase de desarrollo en la que un óvulo fecundado se transforma en el organismo parcialmente formado que se denomina embrión.

Enana blanca. Punto final en la evolución de muchas estrellas, en el que los núcleos atómicos forman una rejilla estrechamente ligada, y los electrones se mueven libremente a través de la rejilla. En la mayoría de las enanas blancas la materia posee una densidad muy superior a la de la materia corriente.

Encajado. Un espacio está encajado en otro espacio de mayores dimensiones cuando puede considerarse que el espacio con

menos dimensiones constituye la superficie de una región del espacio superior. Un ejemplo de ello es el espacio bidimensional definido como superficie de una esfera dentro de un espacio tridimensional.

Energía. Propiedad de la materia, que implica la velocidad de los objetos, su masa y su posición relativa. La energía total de un conjunto de objetos en interacción no cambia con el tiempo.

Energía, densidad de. Cantidad de energía presente en cada volumen de espacio. La magnitud de tal densidad en el Universo en conjunto determina si éste es finito o infinito.

Energía de reposo. Forma de energía que posee un objeto aunque no se esté moviendo y se encuentre lejos de cualquier otro objeto. La energía de reposo de un objeto es proporcional a su masa.

Entropía. Cantidad física que mide la cantidad de desorden que hay en un sistema. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, nunca puede disminuir la entropía de un sistema aislado.

Envejecimiento de «usar y tirar». Teoría que supone que el envejecimiento es consecuencia de influjos ambientales que perturban el funcionamiento normal del organismo.

Envejecimiento programado. Teoría según la cual el envejecimiento es consecuencia de determinadas instrucciones contenidas dentro del material genético de un organismo.

Enzima. Molécula de proteína que actúa como catalizador en reacciones bioquímicas.

Enzimas de restricción. Proteínas que cortan las dobles cadenas de ADN en lugares determinados, donde comienzan o acaban subsecuencias específicas.

Equilibrio. En cualquier sistema físico dentro de un entorno específico, el estado de equilibrio es aquella situación en la que no tienen lugar cambios espontáneos en las propiedades del sistema.

Espacio-tiempo. Según la teoría especial de la relatividad, los diferentes observadores medirán valores diferentes de las coordenadas espaciotemporales de los diversos objetos. Dado que las mediciones del espacio y el tiempo se hallan entrelazadas de este modo, resulta atractivo desde el punto de vista matemático describir las leyes físicas empleando cuatro dimensiones, tres espaciales y una temporal. El sistema matemático resultante se denomina espacio-tiempo tetradimensional.

Espín. Atributo de las partículas subatómicas, análogo a la rotación en torno a un eje interno. En la teoría cuántica, el espín de una partícula sólo puede adoptar determinados valores, que son múltiplos de una unidad básica.

Estado. En la mecánica cuántica, cuando sabemos todo lo posible en un momento dado acerca de un sistema físico, se dice que el sistema se halla en un estado. Por ejemplo, un electrón está en un estado cuando conocemos su momento lineal y su dirección de espín.

Estrella de neutrones. Estrella colapsada, que está formada en su mayor parte por neutrones, con una densidad extremadamente elevada.

Eucariotas. Organismos formados por una o más células, cada una de las cuales contiene un núcleo peculiar y otras estructuras, por ejemplo mitocondrias.

Fase. Propiedad de una onda; describe el lugar en que se halla un punto específico a lo largo del ciclo de la onda, entre un punto máximo y otro. Otro significado alternativo de onda consiste en cualquiera de las diversas formas que puede tomar una sustancia específica (el H_2O, por ejemplo, puede presentarse como vapor, agua líquida o hielo).

Fase, cambio de. Cambio brusco en las propiedades de una sustancia o del espacio, que tiene lugar cuando cambia el valor numérico de uno de los aspectos de su entorno. Un ejemplo de ello es la congelación del agua cuando ésta se enfría por debajo de los cero grados centígrados.

Feynman, diagramas de. Cuadro utilizado por los físicos teóricos. Los diagramas ilustran, de forma aproximada, los procesos que se dan entre determinadas partículas subatómicas, en cuanto combinaciones de procesos más sencillos. También permiten, mediante un conjunto de reglas, calcular la probabilidad de que se produzca cada proceso.

Fotón. Las partículas que constituyen la luz. Los fotones no tienen masa y tampoco tienen carga eléctrica, pero son portadores de una unidad de espín. Son las partículas más numerosas del Universo actual.

Fotosíntesis. Proceso que llevan a cabo las plantas y algunos otros organismos, a través del cual la energía procedente de la luz solar se utiliza para producir hidratos de carbono a partir del agua y del dióxido de carbono.

Geometría euclidiana. Geometría habitual —estudiada por los antiguos griegos— a la que le corresponde un espacio sin curvatura. Los matemáticos del siglo XIX descubrieron diferentes formas de geometría, que se denominan no euclidianas.

Gluón. Tipo de partícula subatómica que establece una fuerte interacción con los quarks y entre sí. Como resultado de dichas interacciones, los quarks y los gluones se unen para formar hadrones. Los gluones tienen masa cero, espín 1 y carecen de carga eléctrica.

Gravedad, ondas de. Cuando objetos con gran masa son sometidos a un movimiento acelerado, se supone que emiten campos gravitatorios, que viajan a través del espacio adoptando patrones ondulatorios, semejantes a las ondas electromagnéticas emitidas durante el movimiento acelerado de objetos con cargas. Se están llevando a cabo intensos esfuerzos para detectar las ondas de gravedad que se piensa que emiten ciertos cuerpos astronómicos.

Gravedad cuántica. Teoría —aún no desarrollada del todo— que toma en cuenta el influjo de la teoría cuántica sobre el comportamiento de la gravedad.

Gravitón. Partícula hipotética, que estaría relacionada con la gravedad del mismo modo que el fotón está relacionado con el electromagnetismo.

Grupos, teoría de. Rama de la matemática que se utiliza en la física subatómica y en otras ramas de la física. Se fundamenta en la noción de grupo, conjunto de objetos matemáticos que posee unas reglas matemáticas definidas, de acuerdo con las cuales dos de ellos se pueden combinar para formar un tercero. Los matemáticos han estudiado muchos grupos diferentes.

Hadrones. Tipo de partícula subatómica, del que forman parte los neutrones y los protones, y que aparecen en las colisiones. Los hadrones son combinaciones de quarks estrechamente unidos entre sí.

Holografía. Proceso que emplea la radiación coherente para producir imágenes tridimensionales con un alto grado de definición.

Homogéneo. Universo homogéneo es aquel en el cual en cada una de sus regiones las condiciones son las mismas, siempre que dichas regiones sean lo bastante grandes. Nuestro Universo parece homogéneo en regiones que tienen una extensión de varios millones de años-luz.

Horizonte. Superficie imaginaria que rodea un agujero negro, de manera que nada de lo que hay en el interior del horizonte pueda salir al Universo exterior. En el caso de un agujero negro no rotatorio de masa estelar, el horizonte es una esfera cuyo radio tiene varios kilómetros.

Imagen del mundo electromagnética. Teoría de la física de principios del siglo XX, que intentaba dar cuenta de todos los fenómenos apelando a los campos electromagnéticos y a sus interacciones.

Imán. Sustancia que generalmente contiene hierro y que puede imantarse de modo permanente mediante la alineación de sus imanes atómicos.

Informática, red. Numerosos terminales informáticos, conectados por líneas telefónicas, de manera que las personas puedan comunicarse a través de ellos.

Ingeniería molecular. Construcción de objetos útiles, a una escala de tamaño molecular.

Inteligencia artificial. Rama de la informática que intenta imitar las funciones intelectuales humanas, por ejemplo, la traducción de una lengua a otra, mediante computadores.

Interacciones débiles. Proceso que puede provocar un cambio en la cantidad o el tipo de partículas presentes en una región, pero sólo con una probabilidad escasa.

Interacciones fuertes. Alguno de los diversos procesos que pueden llevar con una probabilidad elevada a un cambio en la cantidad o el tipo de partículas subatómicas presentes en una región.

Interferencia. Combinación de dos haces de radiación coherente, que produce un resultado que difiere en intensidad de un punto a otro del espacio.

Interferómetro de láser. Dispositivo utilizado para medir con gran precisión las separaciones entre objetos. Emplea dos haces de láser, de modo que se interfieran entre sí, y cuya pauta de interferencia depende de la separación que se esté midiendo.

Leptones. Clase de partículas subatómicas, de la cual forman parte los electrones y los neutrinos. Los leptones tienen un espín de 1/2 unidad, y no entran en interacción con los gluones.

Litografía. Método para imprimir un patrón sobre una superficie, eliminando de forma selectiva parte del material que cubre la superficie.

Longitud de onda. Propiedad de una onda medida por la distancia existente entre dos puntos máximos sucesivos de dicha onda. Los diferentes colores de la luz corresponden a diferentes longitudes de onda electromagnética.

Materia colapsada. Materia cuya densidad es muy superior a la de la materia corriente, porque no contiene electrones o porque los electrones están unidos entre sí con más fuerza.

Mecánica cuántica relativista. Teoría que combina los principios de la mecánica cuántica con los de la teoría especial de la relatividad de Einstein. Las teorías del campo cuántico son una de las partes de la mecánica cuántica relativista.

Metamorfosis. Cambio de un organismo —a lo largo del proceso de desarrollo— mediante el cual pasa de una forma a otra radicalmente distinta, por ejemplo, desde oruga hasta mariposa.

Método Montecarlo. Manera de calcular integrales difíciles, evaluando la función que hay que integrar en un conjunto de puntos al azar.

Microfilamentos y microtúbulos. Largas y finas cadenas de proteínas dentro de las células, cuya actividad produce movimientos y cambios de forma en las células.

Microondas. Forma de radiación electromagnética, cuya longitud de onda está entre la de las ondas de radio y la de la luz visible.

Microsensor. Diminuto dispositivo que puede implantarse en un objeto, para supervisar la forma en que determinada propiedad de dicho objeto varía a lo largo del tiempo.

Mitocondrias. Partes del citoplasma de la mayoría de las células eucarióticas que contienen su propio ADN, y que participan en la producción y el traslado de energía dentro de la célula.

Modelo baconiano. Modelo de actuación de la ciencia, descrito por Francis Bacon. Según este modelo, los científicos acumulan datos sin remitirse a hipótesis previas, y a continuación buscan posibles patrones fijos en dichos datos.

Modelo mecanicista. Descripción en la que se considera que un sistema físico se comporta como un conjunto de objetos que se mueve de acuerdo a las leyes del movimiento de New-

ton. Durante el siglo XIX se utilizaron frecuentemente modelos mecanicistas de la luz y del electromagnetismo.

Momento lineal. Cualidad de las partículas, proporcional a la masa y a la velocidad, cuyo valor total permanece constante cuando se establece una interacción entre varias partículas.

Monómero. Unidad —por ejemplo, un átomo o una molécula pequeña— que unida a otras muchas del mismo tipo forma una cadena u otra estructura que constituye un polímero.

Monopolo magnético. Tipo hipotético de partícula subatómica, cuya existencia predicen ciertas teorías del campo cuántico. Los monopolos magnéticos actuarían como orígenes del campo magnético. Se supone que tienen una gran masa, y también que son extremadamente infrecuentes en nuestro Universo.

Morfogénesis. Proceso mediante el cual dentro de un organismo se construyen estructuras con una forma definida —los tejidos, por ejemplo— a través del crecimiento y el movimiento de células.

Movimiento periódico. Movimiento que vuelve una y otra vez al mismo sitio, por ejemplo, la órbita de un planeta alrededor del Sol.

Neutrino. Uno de los numerosos tipos de partículas subatómicas, que se caracterizan por no tener carga eléctrica, un espín de 1/2 unidad, una masa pequeña o igual a cero, y una baja tasa de interacción con otras partículas.

Neutrón. Partícula subatómica que se encuentra en los núcleos de los átomos. Los neutrones no llevan carga eléctrica y —como los protones— están formados por tres quarks. Los neutrones aislados son inestables con respecto a la decadencia en protones, electrones y neutrinos.

Orden. Algunos sistemas físicos pueden asumir configuraciones muy diferentes. Si el sistema sólo aparece en una de sus configuraciones posibles —o en una cantidad muy pequeña de éstas— se dice que posee un elevado grado de orden.

Ordinograma. Representación gráfica de un programa informático, en el que cada elemento de la imagen agrupa muchos pasos del programa.

Paralelo, procesos en. Procesos mutuamente dependientes, que ocurren al mismo tiempo dentro de un sistema natural —por ejemplo, una célula— o un sistema artificial —por ejemplo, un computador—.

Parámetro. Las ecuaciones que describen una situación física contienen una o varias cantidades numéricas que pueden variar entre las distintas situaciones. Estas cantidades numéricas reciben el nombre de parámetros.

Partículas fósiles. Partículas subatómicas que han sobrevivido desde el Universo primitivo, cuando fueron producidas en grandes cantidades.

Partículas subatómicas. De acuerdo con lo que actualmente saben los físicos, constituyentes últimos de la materia. Las partículas subatómicas poseen determinadas propiedades, por ejemplo, energía y carga eléctrica. Los trozos más pequeños de materia visible están compuestos por gran cantidad de tales partículas.

Pauli, principio de exclusión de. Ley que afirma que dos partículas de espín 1/2 y del mismo tipo no pueden tener propiedades idénticas en un momento determinado.

Plasma. Forma de materia en la que los electrones y los núcleos se encuentran separados unos de otros y se mueven de manera independiente. Los plasmas existen en condiciones de elevada temperatura, por ejemplo, en el interior de las estrellas.

Platonismo. Enfoque acerca de la naturaleza de la matemática, según el cual los objetos matemáticos —por ejemplo, los números— existen en un Universo que les es propio y que puede ser percibido por los matemáticos.

Polímero. Agregado de muchas unidades individuales, llamadas monómeros, que están unidas por lo general de un modo

químico en una forma geométrica específica, por ejemplo, una cadena. Los monómeros pueden ser de un solo tipo, o de varios tipos diferentes.

Positrón. Tipo de partícula subatómica; es la antipartícula del electrón. En el actual Universo los positrones no son nada frecuentes, pero en el Universo primitivo eran casi tan corrientes como los electrones.

Proteínas. Sustancias biológicas basadas en los polímeros de unos veinte aminoácidos distintos. En sus estados biológicamente activos, las proteínas pueden implicar varias cadenas distintas de polímeros, que se enrollan en complejas formas tridimensionales.

Protón. Partícula subatómica que se encuentra en el núcleo de los átomos. Los protones poseen carga eléctrica positiva y están formados por tres quarks estrechamente unidos.

Quark. Uno de los distintos tipos de partícula subatómica. Dos tipos de quark forman los neutrones y los protones, partículas que se encuentran en los núcleos de la materia corriente. Se considera que los quarks sólo pueden encontrarse ligados en grupos, de manera que sólo hay datos indirectos de su existencia.

Quasars. Objetos astronómicos, algunos de los cuales están muy lejos de nosotros, que emiten grandes cantidades de energía radiante.

Radiación coherente. Radiación cuya fase varía de manera regular entre punto y punto del espacio y el tiempo.

Radiación cósmica. Corriente de partículas subatómicas, en su mayoría protones de alta energía, que atraviesa el espacio y a veces incide sobre la Tierra.

Rayos gamma. Tipo de radiación electromagnética con longitud de onda muy corta, emitida en ciertas decadencias radiactivas.

Regularización. Procedimiento matemático a través del cual algunas de las ecuaciones del campo cuántico —que al parecer predicen respuestas infinitas a preguntas de interés físico— se modifican de manera que las respuestas sean finitas.

Rejilla. Estructura discreta de puntos, en tres o más dimensiones, que se ajusta a una regla que determina cuáles son los puntos que están conectados entre sí.

Relatividad especial, teoría de la. Teoría física, que Einstein fue el primero en diseñar, y que describe la relación existente entre la manera en que aparece un sistema físico ante los observadores que se mueven uniformemente y otro sistema.

Relatividad general, teoría de la. Teoría diseñada por Einstein alrededor de 1915, que describe la influencia recíproca del espacio-tiempo y de la materia sobre las propiedades de la otra parte. Explica el fenómeno que llamamos gravedad con más exactitud que la anterior teoría de Newton.

Ribosomas. Partes de una célula que están formadas por proteínas y una forma de ARN. En los ribosomas se efectúa la síntesis proteínica dentro de la célula.

Secuenciación tipo escopeta. Método para secuenciar ácidos nucleicos, mediante el cual se parte la cadena inicial de varios segmentos superpuestos, y a continuación se reconstruye la secuencia a partir de lo que se conoce acerca de estos segmentos.

Secuenciar. Determinar el orden de las bases a lo largo de una cadena de ácido nucleico, o de los aminoácidos de una cadena de proteínas.

Simetría. Cuando uno o varios objetos poseen propiedades iguales o que están relacionadas entre sí de un modo simple. se dice que las propiedades relacionadas manifiestan una simetría. Un ejemplo de ello es que la energía de un átomo en un espacio vacío es la misma, sea cual fuere la dirección de su espín.

Simetría de inversión temporal. Principio de la física subatómica, que implica que el ritmo de un proceso físico es igual al

ritmo del proceso que se obtiene invirtiendo la dirección en que transcurre el tiempo. Algunos procesos de decadencia poco frecuentes no se ajustan a este principio, y el motivo de ello no se conoce del todo.

Simetría interna. Relación matemática entre las propiedades de partículas subatómicas o de campos cuánticos, que es válida en un punto específico del espacio-tiempo. Otras simetrías —por ejemplo, las incluidas en la teoría de la relatividad especial— relacionan propiedades en puntos diferentes del espacio-tiempo.

Simetría rota. Situación —frecuente en la teoría del campo cuántico (así como en otras ramas de la física)— en la que las soluciones observadas en un conjunto de ecuaciones no manifiestan toda la simetría que existe en las ecuaciones mismas.

Sincrotrón. Tipo de acelerador de partículas subatómicas. Los sincrotrones que aceleran electrones emiten grandes cantidades de radiación electromagnética, que se conoce con el nombre de radiación de sincrotrón.

Singularidad. Región del espacio-tiempo donde los efectos de la gravedad son tan considerables que no puede aplicarse la descripción habitual de los fenómenos físicos.

Supersimetría. Simetría interna de algunas de las teorías del campo cuántico que se han propuesto, en la que se relacionan los campos que describen partículas con espín 1/2 con campos que describen partículas con espín 0 ó 1.

Tensores, análisis de. Rama de la matemática utilizada en la teoría general de la relatividad. El análisis de tensores estudia la forma en que los diferentes observadores ven los diversos aspectos del espacio, el tiempo y otras magnitudes físicas.

Termodinámica. Rama de la física que estudia las propiedades de la materia en general, por ejemplo, los cambios de calor y de temperatura.

Topología. Rama de la matemática que estudia cómo pueden conectarse los puntos en el espacio, y las propiedades de un espacio que permanecen inmodificadas cuando el espacio se distorsiona en alguna forma.

Transcripción. Proceso por el cual se utiliza la información que hay en una cadena de ADN para producir una cadena de ARN con información equivalente.

Turbulento. Los fluidos a alta velocidad fluyen al azar, de modo que no existe relación entre la dirección o la velocidad del flujo en puntos cercanos. A dicho flujo se le denomina flujo turbulento.

Twistors. Los *twistors* son objetos matemáticos consistentes en pares de números complejos. Se ha propuesto su utilización como modo alternativo de describir el espacio-tiempo.

Universo inflacionista. Teoría cosmológica según la cual nuestro Universo pasó por un período de expansión extremadamente rápida muy poco después de comenzar a existir. Al final de este período de «inflación», el Universo adquirió su actual expansión, más pausada.

Vacío, fluctuaciones en el. Cambios en la cantidad de campos cuánticos que están presentes en un espacio que si no fuese por ellos estaría vacío. Dichos cambios se producen una y otra vez durante lapsos muy cortos, como prescribe el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Valores iniciales. Cuando una ecuación describe la forma en que determinada cantidad física cambia con el tiempo, suele ser necesario especificar el valor que la cantidad posee en un momento inicial, para predecir los valores que tomará más adelante. Las cantidades que asume en un primer momento se denominan valores iniciales.

W, partícula. Partícula subatómica, observada por primera vez en 1983, que interviene en un tipo de interacción denominado interacciones débiles.



BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. **Stephen Hawking.** *Una vida para la ciencia.* Michael White y John Gribbin
2. **La verdadera historia de los dinosaurios.** Alan Charig
3. **La explosión demográfica.** *El principal problema ecológico.* Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich
4. **El monstruo subatómico.** *Una exploración de los misterios del Universo.* Isaac Asimov
5. **El gen egoísta.** *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
6. **La evolución de la física.** Albert Einstein y Leopold Infeld
7. **El secreto del Universo.** *Y otros ensayos científicos.* Isaac Asimov
8. **Qué es la vida.** Joël de Rosnay
9. **Los tres primeros minutos del Universo.** Steven Weinberg
10. **Dormir y soñar.** *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
11. **El hombre mecánico.** *El futuro de la robótica y la inteligencia humana.* Hans Moravec
12. **La superconductividad.** *Historia y leyendas.* Sven Ortoli y Jean Klein
13. **Introducción a la ecología.** *De la biosfera a la antroposfera.* Josep Peñuelas
14. **Miscelánea matemática.** Martin Gardner
15. **El Universo desbocado.** *Del Big Bang a la catástrofe final.* Paul Davies
16. **Biotecnología.** *Una nueva revolución industrial.* Steve Prentis
17. **El telar mágico.** *El cerebro humano y la computadora.* Robert Jastrow
18. **A través de la ventana.** *Treinta años estudiando a los chimpancés.* Jane Goodall
19. **Einstein.** Banesh Hoffmann
20. **La doble hélice.** *Un relato autobiográfico sobre el descubrimiento del ADN.* James Watson
21. **Cien mil millones de soles.** *Estructura y evolución de las estrellas.* Rudolf Kippenhahn
22. **El planeta viviente.** *La adaptación de las especies a su medio.* David Attenborough
23. **Evolución humana.** Roger Lewin
24. **El divorcio entre las gaviotas.** *Lo que nos enseña el comportamiento de los animales.* William Jordan
25. **Lorenz.** Alec Nisbett





